清 华 大 学 汽 车 工 程 系 列 教 材

汽车动力系统试验学

Powertrain Testing Technology

主编　黄海燕
Huang Haiyan

清华大学出版社

Powertrain
Testing Technology

清华大学汽车工程系列教材

汽车动力系统试验学

Powertrain Testing Technlolgy

主　编　黄海燕
参　编　卢兰光　金振华　肖建华　徐梁飞　阎东林

清华大学出版社
北　京

内 容 简 介

本书是对现代汽车动力系统试验技术进行较全面系统论述的专业教科书。本书共有11章。书中首先论述了进行汽车内燃机试验所必备的台架系统、测试技术及法规、试验标准和试验内容及方法等基础知识；然后系统地介绍了国标规定的汽车内燃机主要性能参数测试、基本性能试验、可靠性试验方法、排放试验方法、电控内燃机匹配与标定试验、内燃机动态模拟试验技术；最后介绍了客车用燃料电池系统主要试验技术、车用动力电池试验技术、混合动力试验技术。本书附录A、B、C分别列出了汽车内燃机试验指导书、示功图绘制方法及试验报告范例。

本书可作为车辆工程专业和能源与动力工程专业本科生的教材或参考书，也可供从事汽车动力系统性能试验的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

汽车动力系统试验学/黄海燕主编. —北京：清华大学出版社，2019
(清华大学汽车工程系列教材)
ISBN 978-7-302-52775-6

Ⅰ. ①汽… Ⅱ. ①黄… Ⅲ. ①汽车－动力系统－试验－高等学校－教材 Ⅳ. ①U463.2-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第076986号

责任编辑：许 龙
封面设计：常雪影
责任校对：刘玉霞
责任印制：沈 露

出版发行：清华大学出版社
网 址：http://www.tup.com.cn，http://www.wqbook.com
地 址：北京清华大学学研大厦A座 **邮 编**：100084
社 总 机：010-62770175 **邮 购**：010-62786544
投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质量反馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
印 装 者：三河市少明印务有限公司
经 销：全国新华书店
开 本：185mm×230mm **印 张**：19.25 **字 数**：421千字
版 次：2019年7月第1版 **印 次**：2019年7月第1次印刷
定 价：52.00元

产品编号：079918-01

前言

随着汽车工业的发展，汽车保有量的增加，能源和环境压力日益加剧，为解决能源危机和环境污染两大问题，汽车能源动力由以前的单一内燃机逐步发展为多种能源动力有效利用的动力系统，如纯电动、油电混合动力、氢燃料电池动力系统等多种形式。为适应汽车新技术的发展，汽车动力试验技术由之前的以单一燃油发动机测试系统为主逐步发展为多种动力源试验系统，因而其相应的试验技术及方法也发生了很大变化。

现代汽车动力系统试验内容和知识是一个极其宽广的领域。为能比较系统地介绍汽车动力系统试验技术，作者与国内多家重点汽车企业工程技术员进行了多次切磋交流，基于本单位相关科研成果，对当今汽车动力系统试验技术进行了系统总结，进而完成了本教材的编写。本书是在2016年出版的《汽车发动机试验学教程(第2版)》的基础上，删除了一些较陈旧的内容，增加了车用动力电池试验技术、混合动力试验技术，丰富了燃料电池试验技术。全书分为四大部分进行论述和介绍。

第一部分对汽车内燃机试验系统及装置、主要参数的测试方法与技术以及整机试验的标准和规范进行了介绍，这些是从事动力系统试验所必备的基础知识。

第二部分以内燃机为试验对象，介绍了国标规定的内燃机稳态性能(起动性能、怠速性能、功率特性、负荷特性、万有特性)试验和可靠性试验；接着介绍了现代汽车内燃机特有而不可缺少的排放污染物试验、电控匹配标定试验和动态模拟试验。

第三部分介绍了新能源汽车动力电池、燃料电池系统、混合动力系统开发过程中的主要试验技术和方法。

本书在介绍相关试验内容和方法的同时，还注重对典型实例的讲解和试验结果的分析，这样不仅使学生能了解汽车动力系统试验过程的全貌，也可提高其分析问题和解决问题的能力，增强工程意识。这些内容对从事汽车能源动力生产、科研、开发技术人员也有参考价值。

第四部分是书中的附录，附录A列出了作者在历年试验教学中编制的多份教学试验指示书，具体说明了各项试验目的、内容、方法以及试验后总结、分析的教学要求；附录B介绍

了内燃机示功图绘制的一种方法；附录C列举了试验报告编写范例。这些内容仅供读者参考。

本书第1、2、4、5章由黄海燕编写，第2章测试系统部分内容由金振华提供，同时，张磊、李振波提供了很多有价值的资料及建议；第3、4章的部分内容由杨学青提供；第3、6章由黄海燕、肖建华、张文彬合编，第7章由黄海燕、龚庆杰、张科勋、杨学青合编，第8章由阎东林编写，第9章由黄海燕、徐梁飞、卢兰光、江洪亮合编，第10章由沈萍、高尚、王昱、卢兰光合编，第11章由金振华、刘鹏合写；附录A1～9的试验指导书由肖建华整理提供，附录10的试验指导书由阎东林提供，附录B由学生陈柯夫、李博远编写，附录C选用某公司柴油机试验报告供读者参考。全书由黄海燕统编。在成书过程中，得到了作者所在单位刘峥、王绍铣、杨福源、帅石金、裴普成、王贺武、张俊智、孙进伟、张云龙、胡尊严、邵扬斌等多位老师和研究生及来自汽车企业的李维成、李儒龙、龚庆杰、张科勋、朱敬安、熊莹、张磊、李振波、王录波、蒋文虎、任尚峰，魏冲，王众，孟令军、邵静月、邓隆阳等工程技术员的大力支持和帮助，他们不仅提供了很多有价值的素材，而且提出了许多宝贵的编写意见，谨在此向他们致以深切的谢意。

就作者了解的情况，本书可能是国内首次对现代汽车动力系统试验进行较全面系统论述的专业书籍。由于作者学术水平和实践经验的局限，书中不可避免存在缺点和疏忽，期望广大读者，特别是从事汽车动力试验技术研究、教学的同行专家予以指正。

目录

第1章 试验及试验方法概述

1.1 概　　述

随着社会经济的发展与人们生活水平的不断提高，人们对汽车节能减排的要求越来越高，为适应这不断变化的要求，设计者需不断设计开发能满足节能减排需求的先进汽车能源动力，且能源动力技术的发展已经呈现了多重混合化的特点，主要表现在内燃机混合化、动力传动系统混合化和燃料电池系统混合化。

由于汽车能源动力从最初设计到最终产品均离不开试验验证，因此汽车能源动力试验测试技术与能源动力技术发展紧密相连。同时汽车能源动力试验测试技术随着科学技术和汽车能源动力技术的发展，尤其是它与现代电子技术、计算机技术相结合，使其早已成为相对独立的一门重要的学科。因此，汽车能源动力试验测试技术的发展促进并支撑着汽车能源动力及动力系统技术的快速发展，也为研制高水平的汽车能源动力提供了重要的保证。

为满足日益严格的汽车排放法规、油耗法规的要求，汽车能源多元化为主要特征的节能与新能源汽车迅速发展，与其相对应的试验方法及试验手段就显得更为重要。正是由于汽车动力系统试验技术和方法的重要地位，不仅汽车工程领域技术人员必须掌握其基本知识，在培养工程人才的教学工作中它也被赋予了更为重要的意义。其教学目的与意义可简要归纳为以下三点。

（1）试验技术和方法的学习是汽车专业人才培养中重要的实践性教学环节。

汽车内燃机原理和规律是百年来广大科技和工程技术人员大量实践和经验的总结，具有极强的实践性质，但还有很多问题和现象无法解释。仅凭书本上的知识是无法真正理解和解决相关技术问题的。在内燃机实验室里面所花的几个小时可以说是对汽车内燃机的“真实世界”的最好介绍，是对课堂教学或者“计算机模拟”世界的最佳鉴别和考核。

此外，针对当今汽车能源动力多重混合化的特点，如何将其各部件有效匹配，是研发汽车动力和动力系统过程中非常重要的环节，因此，与其对应的汽车动力和动力系统试验方法

及手段的掌握就显得更为重要。

(2) 试验技术和方法是从事汽车能源动力生产、技术开发工作的必备知识。

作为汽车的心脏——能源动力,其特点是零部件多,使用条件复杂,对性能、寿命、质量和成本等方面的要求高。而影响汽车能源动力质量和性能的因素又很多,所涉及的技术领域极为广泛,对其中一些问题的研究目前还不够充分。因此对汽车能源动力而言,无论是新设计、开发的产品还是生产中的产品,即使在设计和制造上考虑得非常充分,也必须经过试验来检验:检验设计思想是否正确;设计目标能否实现;设计及生产的产品性能是否符合使用要求等。

(3) 试验技术与设备是汽车能源动力研发、创新、理论发展的必备手段。

随着汽车工业的发展,从节约燃料消耗、扩大燃料品种、提高有效功率、降低排气污染到耐久性等方面都对汽车能源动力提出了更高的要求,这就需要人们不断地研究能源动力各关键部件的内部规律、匹配技术和新技术,需要制定更严格的排放法规和油耗法规等。这样就会对试验方法、试验标准、试验平台等提出更高的要求。同时为了提高能源动力各类参数的测量精度,也需要有先进的能源动力试验平台。因此,国内外各大汽车制造厂商纷纷投入巨资建立现代化的动力系统试验室,对汽车能源动力进行不同目标的研发试验研究。在后面相关章节中将分别对其能源动力试验平台进行介绍。

1.2 试验发展概况及类别

1.2.1 内燃机试验测试技术发展概述

随着科学技术和内燃机技术的发展,在20世纪中叶内燃机试验测试技术已成为相对独立的一门重要的学科。它促进并支撑着内燃机技术的快速发展,为研制高水平的内燃机提供了重要的保证。概括起来主要经历了以下几个重要阶段。

1. 初级阶段

在内燃机测试发展的初级阶段,因被测内燃机关注的参数少及计算机科学还没有普及,因而早期的内燃机试验是采取人工绘制试验数据表格,将记录的试验数据填写在试验数据表格内并进行人工数据处理。此外,在测试手段方面,用于内燃机测试的测功机功能单一,参数测量方法功能也单一。因此,在这个阶段,内燃机测试手段只能满足单一试验项目的测试要求。

2. 试验自动化阶段

随着内燃机技术的发展,应用范围的扩大,及节能减排等要求的日益加严,需关注更多的内燃机测试参数。为提高其试验效率,降低其试验成本,且实时有效地测量更多的试验参数,需借助计算机技术、信息技术和自动控制等技术的发展,使内燃机试验由以前的手工操作、手工记录试验数据逐步发展成为采用计算机完成内燃机台架试验数据的自动采集、自动

处理和自动控制试验工况等。即科学技术的进步，使人们实现了将信号处理、自动控制、数学运算、电子技术、人工智能等技术融合为一体，进而可同时获得大量的测量采集数据，并能根据设定进行实时显示及监控，同时可提供良好的数据处理能力。

内燃机试验自动化的进程也伴随着内燃机测功机技术、传感器等技术的快速发展，有关此类信息，可参阅第 2 章。

3. 仿真试验阶段

为减轻内燃机开发试验强度，降低试验成本，提高内燃机开发速度，借助电子技术、计算机仿真技术、信息技术等先进技术，内燃机仿真试验技术得到了蓬勃发展。即在新产品进入试制阶段前，对其性能、可靠性、振动噪声等先采取仿真试验，然后再进行实物试验，以达到缩短设计开发周期、降低试验成本的目的。

目前，有很多内燃机设计开发机构利用多年内燃机开发设计经验、试验经验及试验数据的积累，建立了不同用处、不同类型的内燃机试验模型。试验模型的建立可以代替部分试验，这些是内燃机设计者能够实现简化试验、提高内燃机预测设计能力的基础。

在内燃机研发过程中如何有效地预测内燃机装车后的运行状态，即如何有效分析内燃机稳态、动态性能及可靠性等，传统的方法是依靠整车试验。然而这种方法费时费力，不具有竞争能力。为解决此类问题，内燃机动态模拟仿真技术得到了快速发展与运用，“车辆模拟”内燃机动态模拟试验可有效提高内燃机开发效率，及早发现汽车内燃机开发过程中的未知问题，当然这种方法需要庞大的知识(数据)库做支撑。进一步信息读者可参阅第 8 章。

1.2.2 汽车能源动力试验测试技术

为解决能源危机和环境污染两大问题，汽车能源动力由以前的单一内燃机逐步发展为多种能源动力有效混合的动力系统，其试验平台及试验方法也是根据不同需求，基于先进内燃机的试验技术建立和发展起来的，如基于模型的集成开发平台，虚拟测试，等等。相关试验测试技术的进一步信息可参阅第 2、9、10、11 章。

1.2.3 汽车能源动力试验类别

汽车能源动力试验按其试验目的和试验对象进行分类，可分为定型生产的产品试验、研制开发的新产品性能评定和标定试验、科学研究专项试验以及人才培养的教学与培训试验。

1. 产品试验

产品试验的目的是检查量产能源动力产品的质量，主要包括产品出厂试验、定期抽查试验及大修后的性能测试。汽车能源动力制造厂成批生产的产品，根据用途不同，出厂时检测要求也不同，一般卡车用能源动力要求逐台进行检测，乘用车能源动力则根据企业具体情况逐台或按比例对能源动力产品进行检测。检测方法根据产品的类型，企业按相应的规范执

行。如内燃机则按企业制定的冷磨合或热磨合试验规范进行。其他项目的试验如可靠性、经济性等一般是采取抽检方式进行检测,以保证出厂产品的质量。试验项目是根据能源动力的用途和特点,在国家标准所规定的范围内选定。

由于生产试验主要以控制产品质量为目的,因此它的特点是试验的产品固定、试验项目固定、测试方法和参数变化也较少,但要求测试设备必须可靠,能适应长期运转的需要。

2. 新产品性能评定和标定试验

性能评定试验的目的是对新产品或经过重大改进的能源动力在其研发的过程中进行局部的或全面的性能测试,以考核其性能指标是否达到设计或改进的要求。

目前新产品开发性能测试通常是仿真试验与台架实物试验相结合,通过试验进一步研究、分析能源动力内部的变化规律。如对于内燃机就是要找出在满足排放法规的情况下,提高其动力性(功率大)、经济性(耗油少)、可靠性(故障少)、耐久性(寿命长)、运转性(起动容易、振动小、低噪声、排污少)等各种性能的途径,以满足整车对内燃机动力的要求。

内燃机性能试验主要包括起动性能、负荷特性、速度特性、怠速特性、机械效率、各缸工作均匀性试验以及匹配标定工况、怠速下的稳定性试验等。(具体台架实物试验内容将在第4章中介绍。)

可靠性及耐久试验也是一种性能试验,而且是人们最为关心的问题。这是因为,如果一台能源动力要经常修理和维护,而且寿命很短,即使能源动力的效率再高、性能再好也是没有意义的。进行耐久性试验所花时间较长,工作量大,其目的是考核新产品或经过重大改进的能源动力(包括零部件)的可靠性、耐久性以及其性能指标的稳定性等。此类试验一般在实验室内进行(将在第5章对其试验方法进行介绍)。当然,有些经验丰富的能源动力设计机构,会在设计开发过程中,利用其试验模型对新产品可靠性及寿命进行预测,同时根据大量能源动力试验数据的持续积累,优化可靠性及耐久性试验方法,进而达到降低可靠性及耐久性试验成本的目的。

新产品的标定试验是指开发各阶段时的能源动力样机各工况性能指标及可调整参数的标定,如电控内燃机经济性、排放性和动力性之间的匹配试验,即MAP的标定工作等(关于电控内燃机匹配标定工作将在第7章介绍);动力系统各关键部件匹配性能试验(将在第11章对混合动力试验进行介绍)等。

另外还有能源动力在特定环境的性能测试,如高温、高寒、高原地区、噪声等特定试验。

3. 科学研究专项试验

科学研究试验也称为专项试验,它是为了研究改进能源动力的性能或科研探索所组织的专题试验,如能源动力各部件、各系统的专题研究、原理与规律的探索、新理论的探讨、新结构形式的确定、新测试方法的论证及新材料新工艺的应用,新能源动力的研究开发以及汽车新型动力系统试验等。这类试验涉及的学科及内容极其广泛,可能包含工程热物理各技术基础的理论,内燃机原理、设计、制造工艺和使用情况等各个方面。如内燃机缸内

燃烧机理的试验研究，内燃机动态模拟试验研究，新型燃料电池发动机、动力电池的研发等项目就属于这一类型。

以上各类试验，除了单项专题研究试验可参照各种标准自行拟定试验规范和方法，其他试验应按国家颁布的汽车用发动机试验标准(GB/T 18297—2001)、客车用燃料电池发电系统测试方法(GB/T 28183—2011)、乘用车用燃料电池发电系统测试方法(GB/T 23645—2009)、电池单体和模组的性能测试标准(GB/T 31486—2015)，或行业与企业制定的标准进行。

4. 教学与培训试验

教学与培训试验的目的是让被培训者(学生及企业工作人员)掌握汽车能源动力性能测试的基本方法；了解测试所需要的最基本的硬件和软件条件及其原理；初步学会试验方案设计、试验数据处理、误差及试验结果分析等技能。针对不同的对象(高校学生或企业被培训者)又有各自的特定要求。高校学生除了上述基本要求外，还要求学习和参与某些力所能及的新产品开发和单项试验，以便扩展思路，能对试验中观察到的现象及发现的问题综合运用所学知识进行分析，提出解决方案，以达到具有初步的科研和开发试验的能力。

1.3　本书内容简介

汽车能源动力试验的内容极为广泛，涉及面广，除了整机试验之外，还有大量的零部件试验，这些试验中有各种性能测试与标定，也有大量的可靠性、耐久性试验和维修检测内容。要在一本教材中全面阐述各方面的内容，既无必要，也不可能。从培养汽车能源动力科研、开发技术人员的具体要求和学校现实的试验硬件条件出发，本书所述汽车动力系统试验主要指的是内燃机整机动力性能试验、匹配标定试验、内燃机排放、燃料电池系统试验、动力电池试验、混合动力试验。所述试验内容主要指在能源动力台架实验间内进行，也包括一些整车室内转鼓及室外运行时的内燃机测试与标定的内容。

汽车动力系统技术的发展伴随着能源动力、动力系统试验测试技术的发展。作者根据近几年来的汽车能源动力及不同混合模式的动力系统技术的发展和相关研究成果，对汽车动力系统试验方法、试验平台等进行了系统编写，希望对从事汽车能源动力试验的工程技术员有一定参考价值。

1. 主要内容

(1) 以汽车内燃机新产品的性能试验为主要讲述对象，并按照国家标准 GB/T 18297—2001 中规定的主要试验项目进行介绍，包括起动试验、怠速试验、功率试验、负荷特性试验、万有特性试验以及机械损失功率试验。这些都是最重要的和常规的试验项目，企业的产品试验也大都按此标准进行。

(2) 引入现代电控内燃机和满足排放法规所必须进行的排放法规鉴定试验和电控机型

的匹配标定试验内容。

(3) 以国家标准为主线,介绍可靠性和耐久性试验方法。

(4) 总结作者所在单位的研究成果,介绍燃料电池系统的试验方法、动力电池试验方法、混合动力试验方法。

(5) 以上所有介绍的试验均在台架实验间内进行,并应用了各种专用设备和试验测试手段。为此,本书有针对性地对这些内容作了简要介绍,着重阐述具体的对象和应用方法,而不是作泛泛的论述。进一步信息读者可在相关的专著中找到所需的各方面的详细内容。

(6) 本书附录介绍了作者所在单位多年来积累编制的多个教学试验大纲。大纲涉及的试验项目及内容与作者所在单位具体条件有关,仅供读者参考。

2. 本书各章内容简介

本书第1章介绍了有关汽车能源动力试验、试验的作用以及整机试验的一些基本知识,如试验分类和内燃机试验标准等,并对内燃机试验测试技术发展历程进行了简要介绍。第2章以车用内燃机为主要试验对象,对保证其试验所需的硬件系统,如测试系统、实验室环境系统等进行了简要描述,同时简要介绍了混合动力试验系统。第3章以车用内燃机为主要试验对象,介绍了其主要性能参数的测量方法及主要传感器的测量原理。第4章介绍了国家标准规定的常用内燃机基本性能试验方法,其中对内燃机功率试验、负荷特性试验和万有特性试验的意义及方法进行了比较详细的论述。第5章讨论了可靠性试验的意义,并对我国汽车内燃机可靠性试验标准进行了描述。第6章介绍内燃机排放法规鉴定试验。第7章和第8章讨论了现代车用内燃机开发试验中所涉及的一些专项试验方法。第7章就电控内燃机匹配标定试验的意义、基本概念和方法进行了简要介绍,通过实例介绍了匹配标定的过程。第8章讨论了在内燃机实验台架上如何进行内燃机动态试验的方法,如模型的建立等。第9章介绍了燃料电池系统开发过程中的试验方法。第10章介绍了动力电池基本试验方法。第11章介绍了混合动力试验方法。最后为附录,附录A对10个内燃机教学试验大纲和具体过程、方法等进行了较详细介绍,便于读者进一步理解内燃机试验教学的情况。附录B以MATLAB软件为例简要介绍了示功图绘制方法。附录C是某试验报告范例,仅供参考。

1.4 汽车能源动力试验的组织与实施

关于试验前的组织与实施,本节主要以内燃机为试验对象进行描述,对于其他能源动力试验的组织与实施,其思路是相通的。

1.4.1 试验前的准备

1. 制定试验大纲

试验大纲是指导试验的重要技术文件,它关系到试验的好坏与成败。根据试验目的的不同,试验大纲的编制侧重点也会有所不同。

对于新产品形式认证试验、质量检查试验，试验大纲应按照相应的国家或行业试验规范编制，并经充分讨论、审批后实施。

对于研究和开发型试验，因其特殊的试验技术和方法，在制定大纲前，要研究所需特殊的试验装置和试验设计方法，即研究如何合理而有效地获得试验数据资料的方法。应认真考虑特殊设备和测试仪器的可行性以及如何合理地安排试验，获取数据及如何进行数据分析等，从而获得最优试验设计方案。上述方案，在试验大纲中应有详细的说明。

试验大纲主要包括以下内容。

1）试验目的

明确规定试验必须完成的任务（如需要解决的技术问题、观察的现象等）以及要求达到的目标（如内燃机额定工况时应达到的功率值，内燃机最低油耗值以及排放限值等）。应在大纲中率先说明。

2）试验对象和试验内容

大纲中应写明：试验件（样品）的名称、型号、生产编号、主要技术参数，为完成试验任务所需的试验内容（例如，是稳态试验还是动态试验，是工况法试验还是一般性能试验等），试验程序（即试验步骤）。对每项试验内容和条件应作简要说明，必要时应附有试验原理图。

3）试验项目和测量参数

大纲中应根据试验内容，详细列出必须进行的试验项目和每个项目中必须测量的参数，并说明由测量参数求得最后性能指标的计算方法，附上必要的计算公式。有关参数测量方法详见第3章。

4）试验设备

根据试验项目和测量参数，选择相应的试验仪器、设备，并写明名称、型号、规格和测量精度范围，如选用水力测功机、电涡流测功机还是电力测功机，选用质量式油耗仪还是容积式油耗仪，选用动态油耗仪还是选用普通油耗仪等。试验目的不同，其测量精度的要求也会不同。有关试验设备信息参见第2章。

5）试验条件

试验条件决定了试验对象处于什么环境中进行测试，这对测试结果有很大影响。试验条件包括环境温度、湿度、大气压力、内燃机所用燃料和润滑油料的规格、状态（指油温、油压），以及冷却水温、内燃机负荷等。

6）试验技术、方法和试验设计

内燃机常规试验，应按照不同的试验项目，依据相应的标准（国家标准、行业标准或企业标准），来规定其试验技术和方法。试验程序（设计）大都按标准进行。

对于研究型或新产品开发试验，应根据产品的目的、目标来确定采用何种方式进行试验。这一类试验的试验设计是非常重要的，这是因为，若试验方案设计正确，对试验结果分析得法，就能够以较少的试验次数、较短的试验周期、较低的试验费用，迅速地得到正确的结论和较好的试验结果；反之，试验设计方案不正确，试验结果分析不当，就会增加试验次数，

延长试验周期，造成人力、物力和时间的浪费，这不仅难以达到预期的效果，甚至还会造成试验的全盘失败。

归纳起来，试验设计包括如下三个方面的内容：工况选择——因素与水平的选取方法；误差控制——试验方案的制定；数据处理——分析试验结果。其中的方案制定与数据处理方法是 20 世纪 30 年代以后数理统计中新发展的一个学科分支，以概率论、数理统计和线性代数等为理论基础。

对于工况选择——因素与水平的选取方法，即采用单因素试验设计，还是多因素试验设计；是采用基于模型的试验方法，还是工况法试验方法，等等。有关这些方法的理论基础可查阅文献[3-6]等。

7）试验数据的处理

试验数据的处理通常分为静态数据处理和动态数据处理两种。静态数据所指的是不随时间变化的测量数据；动态数据所指的是随时间变化的测量数据。因此，应说明试验数据是采用何种处理方法；数据处理的手段是采用人工处理、专项分析仪处理还是计算机处理等。

8）误差分析

内燃机试验的目的是输出信息，而这些信息的价值很大程度上取决于它们的精确度。因此，试验者除了应对内燃机有一个完整的理解之外，还应懂得在进行内燃机试验过程中，由于环境的影响，试验方法和试验设备、仪器的不完善以及试验人员的认知能力有限等原因，使得在测量与试验所得数据和被测量的真值之间不可避免地存在着差异，这在数值上即表现为误差。虽然测量技术不断提高，但是完全消除误差是不可能的，也就是说，在任何测量过程中，测量结果均存在着误差。

试验误差的来源主要有以下几个方面。

（1）仪器误差：由于仪器设计、制造不精确或调整、校正不当或使用不当等原因而引起的误差。

（2）环境误差：由于各种环境因素与要求的标准状态不一致而造成的误差，如温度、湿度、气压、振动、电场以及磁场等引起的误差。

（3）方法误差：由于测试方法不合理、仪器位置安装不正确、使用不当或计算方法不完善等因素造成的测量误差。因此，试验者对不同测量方法的相对优点和缺点以及不同测试方法在不同试验情形下的适用范围要有深刻的理解。

（4）人员误差：由于测量者主观原因所造成的误差。如试验者操作不当，或有些数据需人工读出，而测量者因工作疲劳引起视觉器官的生理变化等引起的误差。

综上所述，测量误差的来源是多方面的，因此，在分析误差来源时应综合考虑，正确计算出误差链，以保证误差分析的准确性，进而保证试验精度。关于误差分析的进一步信息可参考文献[7,8]及其他相关专著。

2．试验设备、试验仪器配备与标定

为了使试验结果准确、可靠，试验者应具有关于仪器校核方法的知识以及了解试验仪器

具有何种类型的误差。进一步说，试验者必须保证测试仪器与设备都能满足试验中测定参数的测量范围、容量、精度和分辨率的要求；使用的电源与仪器设备应相适应；试验前还应对各种传感器、测试仪器和仪表按照说明书的要求进行预热、调试、校正和标定（定度）等。如在进行内燃机排放测试前后，需对测量的 HC、CO、NO_x 等进行零点标定、量程标定，标定的数据应记录并填入试验报告中。

3. 人员配备和记录表格准备

根据试验项目和测试数据，确定参加试验人员，而试验人员不仅应熟练掌握仪器设备的原理和操作方法（如测功机的操作、排放仪的使用等），还要确定每人的任务和相互间的配合，明确试验方法，并能正确地对整个试验过程及试验现象进行记录并整理试验结果。

进一步说，试验者对所有试验观测值应具有进行质疑的思维习惯，即应具备以下习惯：分析、比较所记录的数据是否可信，是否有不符合规律的谬误之处。当发现问题时能及时在试验中解决。

为保证日后的分析比较，在试验之前，需要将试验背景资料（试验对象的名称、型号，试验大气状态，试验日期、时间、地点等）输入到计算机中或手写到试验记录本上。为避免意外（如计算机故障），应保存试验的原始记录（即试验人员在试验现场手工书写的记录）。内燃机试验记录表格可参考表 1-1 绘制。

4. 安全措施准备

内燃机实验室是比较危险的工作场所，对这一点试验工程师及有关人员（包括学生在内）应有充分认识。因此，为保证安全，在进行内燃机试验教学过程中需注意不得超过试验大纲中规定的允许最大工作负荷、最高转速、最大压力等极限值。试验过程中不仅要时刻注意内燃机可能发生的异常现象，并加以记录，同时学生要知道实验间紧急按钮、试验设备的操作规程，严格遵守实验室规章制度；在进行内燃机试验时，学生不能站在内燃机输出轴的侧面，因为高速旋转的联轴器中的任何零部件一旦甩出，将十分危险。试验中如发现内燃机、设备及仪器出现异常情况或故障时，应停止试验、进行检修。在进行新能源动力，如燃料电池系统、动力电池试验时，试验人员应充分了解相关安全手册，避免氢气泄漏、触电、起火等安全事故。另外为保证安全，无论做何种试验，参加试验人员应在 2 人以上。

5. 试验前后的主要操作规程

根据试验目的的不同，试验前后的操作规程均有其特殊规定。本节以普通内燃机为试验对象，简要介绍其试验前后的主要操作规程。同样，动力电池、燃料电池也有其相应的操作规程。

1）内燃机试验前的主要试验操作规程

（1）按各实验室操作规程和安全制度进行检查；

（2）检查燃油系统连接的可靠性及是否有泄漏问题；

（3）内燃机电路系统连接是否正确；

表 1-1　内燃机试验数据记录表

内燃机型号________号码________
测功机型号________________
进气温度________________K(或℃)
大气温度：干球______℃,湿球______℃
进气总压____________kPa(或 mmHg)
水蒸气分压__________kPa(或 mmHg)

试 验 目 的
____
____

试验单位________________
试验日期________________
试　验　人________________
燃油密度____________g/cm³
校正系数________________

序号	测 功 机		有效功率/kW		有效扭矩/(N·m)		燃油消耗量			燃油消耗率/(g/(kW·h))		机油								
	转速/(r/min)	扭矩/(N·m)	实测	校正	实测	校正	容积或质量/(cm³或 g)	历时/s	实测/(kg/h)	实测	校正	压力/kPa								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

(4) 所有需要冷却的设备(发动机、测功机、进气中冷器等)冷却水应已打开;

(5) 内燃机机油油面应在规定的高度,检查机油是否有泄漏现象,通过机油尺查看机油量是否处于合适范围;

(6) 检查内燃机安装是否正确,是否有松动现象(如排气管);

(7) 通风系统在内燃机起动前打开,用于净化试验室内的易燃蒸气;

(8) 检查试验室从控制台到实验间通道有无障碍,在试验时设置防止随意进入标识;

(9) 按照操作说明书检测内燃机试验操作系统是否正常等;

(10) 预先打开火警系统。

2) 内燃机起动后应立即检查的主要项目

(1) 机油压力是否达到规定值;

(2) 当内燃机达到稳定怠速时,应该在实验室内快速检查,汽车内燃机周围是否安全,特别要观察内燃机燃油和机油是否泄漏,并且要注意听有无不正常的噪声;

(3) 检查内燃机内外循环水系统是否有漏水现象;

(4) 检查操作试验台的测试紧急关闭系统,以确保其安全可靠;

(5) 重新起动内燃机,进行内燃机试验,热机完成待冷却水温度和机油温度达到合适范围后开始测量并记录数据。

3) 内燃机试验结束时应立即检查的项目

(1) 按规定关闭(台架)燃油、水、电等系统;

(2) 试验数据保存、转换等;

(3) 关闭实验室冷却系统、通风系统,并进行检查。

1.4.2　试验过程

试验过程一般包括 4 个阶段(不含使用试验):起动预热、工况监测、采样读数和校核数据。

内燃机在进行正式试验前,都必须经过起动预热过程,另有规定时除外(如内燃机冷起动试验)。试验过程中,应随时监测内燃机的运转状态(如内燃机水温、机油温度等),检查测试仪器的工作状况。当内燃机达到正常工作温度(一般水温为 85～90℃,机油温度为 90～100℃),且每一个试验工况的转速和负荷均保持稳定后,方可进行各种试验。试验应按照试验大纲的要求进行,在指定工况下测取试验数据和记录。在稳态试验中,要读取或记录内燃机在稳定工况下一定时间内的平均值(稳定值);在动态瞬时试验中,要使被试件的动作和记录同步,并采用自动采样记录系统。试验结束后,应立即汇总主要测试数据,检查、校核各参数测定值,及时做出试验是否有效的判断。若发现有问题,则要分析原因,采取改进措施,重新进行试验。

1.4.3　试验总结与分析

试验完成后的总结工作包括:对试验中观察到的现象和发现的问题进行定性的分析研

究；对测得的数据进行处理，获取必要的信息和参数，以确定实测所得的性能指标和参数间的关系；争取对试验数据和资料再进一步归纳上升至理论高度，得出规律；最后对试验做出评价和结论，写出试验报告。

1. 数据处理

试验总结阶段中，试验数据的处理是非常重要的一项内容。要求对测量所获得的一系列数据进行深入的分析，以便得到各参数之间的关系，甚至用数学解析方法，导出各参数之间的函数关系。

前面已介绍过试验数据的处理通常分静态数据处理和动态数据处理。汽车内燃机教学试验的数据处理常采用静态数据处理。静态数据处理通常采用3种方法，即数字表格法、图示法和经验公式法。

1）数字表格法

数字表格法就是用表格来表示函数的方法，在工程技术上应用较多。经过测量获得的一系列测量数据都是首先列成表格，然后再进行其他的处理。

2）图示法

图示表达是根据试验结果做出的尽可能反映真实情况的曲线。通过作图，可以非常直观地看出试验数据变化的趋势、特征及函数的变化规律。例如，是递增还是递减，是否有周期性变化规律，是否存在最大值与最小值等。作图过程中，在认真分析试验数据的基础上，要注意坐标的选择、分度和数据描点等问题，以便使试验曲线能正确地反映其真实关系。图示法能非常直观地表达试验数据的函数变化关系，但不能进行数学分析。

3）经验公式法

经验公式法就是利用回归分析的方法确定测试数据间的函数类型及其参数，也就是建立与试验曲线对应的公式。经验公式法不仅简洁扼要，而且可以对公式进行必要的数学运算，以研究自变量与因变量之间的函数关系。

动态试验数据的处理要比静态复杂。其数据处理的步骤一般分为数据准备、数据检验、数据分析3个阶段。进一步信息可参阅相关专著及文献。

2. 试验报告

试验报告是对试验过程总结的最好体现，高质量的试验报告不仅能对当下试验进行有效总结，还可为日后相关研究积累有效素材，因此，试验报告的有效编写，具有非常重要的意义。

一般来说，试验报告的内容主要包括：

（1）试验报告封面。封面上应写有试验单位名称、报告名称、编号、校对、审核、批准、日期及报告编号。

（2）试验任务来源（即立项依据）。是新产品设计验证试验、新机型匹配标定试验还是为提高某种产品可靠性、适应性所需进行的相关试验等。

（3）试验目的。报告需对本次试验的具体目标进行描述。如本次试验目的是考核内燃

机进气管改进后其性能变化状况，是否达到预期效果，或改进其某个零件后，其整机可靠性是否有影响等。

(4) 试验时间、地点及试验参加人员。报告中需对试验时间、地点及试验人员进行注明。

(5) 试验对象。需对试验对象主要技术参数及结构特点进行描述。

(6) 试验条件描述。如环境温度(气温、气压、湿度等)、试验环境、测试工况等。

(7) 试验手段。描述试验所用仪器设备主要功能及技术参数，测试系统仪器的选配，传感器标定及精度等。

(8) 试验方法。简介试验方法依据、试验方法及过程描述。

(9) 试验数据处理方法及结果分析。简要介绍试验数据采取何种处理方法、试验数据处理结果分析及误差范围；综合分析试验结果，在此基础上对其进行评价，并提出存在的问题，提出进一步改进意见等。

(10) 附录。包括典型试验记录曲线、数据处理结果表、试验规律曲线及工况照片等。

附录 C 是某项试验报告范例，供读者参考。

1.5　试验标准

1.5.1　标准概述

由于试验方法、试验条件、使用仪表、试验环境等的不同，会使汽车能源动力系统台架试验的试验结果出现很大差异。为了避免由此引起的争论和混乱，使试验得到客观的可比结果，就需要制定试验标准。所谓标准就是以科学、技术和实践经验为基础，经有关方面协调一致，由主管机构批准，以特定形式发布，作为共同遵守的准则和依据。试验标准不同于一般性的试验方法，它具有一定的权威性、通用性、先进性和相对稳定性，是衡量能源动力产品质量和各项工作的依据。

能源动力各种试验标准繁多，按其管理级别和适用性范围的不同分为国际标准、国家标准和地方标准、行业标准，以及企业标准等，按标准的属性又可划分为强制性标准和推荐性标准。

1. 国际标准

国际标准是指国际标准化组织(International Organization for Standardization，ISO)、国际电工委员会(International Electrotechnical Commission，IEC)和国际电信联盟(International Telecommunication Union，ITU)以及国际标准化组织确认并公布的其他国际组织制定的标准，也是各会员国统一执行的标准。ISO 是世界上最大的非政府性国际标准化机构，是联合国的高级咨询机构。中国于 1978 年 9 月加入 ISO。

2. 国家标准和地方标准

国家标准和地方标准是各国或各地区依据自己的国情、区情而制定的适用于本国和本地区的标准。中国国家标准简称 GB。美国国家标准协会(American National Standards

Institute，ANSI)制定的标准为美国标准，简称为 ANSI，日本的国家级标准简写为 JIS。

3. 行业标准

行业标准是在全国某个行业范围内统一的技术标准。在我国该标准由国务院行政主管部门制定并报国务院标准化行政主管部门备案，称为行业标准。行业标准是为了规范本行业所辖各部门产品试验方法而制定的。如中国汽车行业标准简称 QC，交通运输部标准为 JT 等。美国汽车工程师学会(Society of Automotive Engineers，SAE)制定的标准，称为 SAE 标准。SAE 所制定的标准具有权威性。因此，不仅在美国国内被广泛采用，而且成为国际上许多国家工业部门和政府机构在编制标准时的依据，为国际上许多机动车辆技术团体广泛采用。负责日本汽车工业界标准化工作的专门机构是日本汽车行业标准化组织(Japanese Automobile Standard Organization，JASO)，在组织结构上，它是日本汽车工程师协会(Japanese Society of Automotive Engineers，JASE)的一个下属部门，即 JASE 标准部，但对外又作为一个独立的团体(即 JASO 组织)开展工作，它负责修订的日本汽车行业标准，称为 JASO 标准。德国汽车工业协会(VDA)由德国 620 多家汽车工业公司组成，成员分为汽车制造商，汽车供应商，拖车、专用车体、客车三大制造集团。VDA 发布了一系列汽车行业标准和建议。

4. 企业标准

企业标准是指各汽车能源动力生产企业，根据自身特点，参考相应国际标准、国家标准而制定的标准，它只限于本企业内使用。通常，企业标准严于国家标准或国际标准，目的是为了提高该企业产品质量和竞争能力。

5. 强制性标准

根据《中华人民共和国标准化法》的规定，国家标准、行业标准分为强制性标准和推荐性标准。强制性标准是为了保障人身健康、安全，保护环境和节约能源而制定的强制执行标准。这类标准一般称为法规，因此，强制性标准必须执行。如中国 GB 3847—2005《车用压燃式发动机和压燃式发动机汽车排放烟度排放限值及测量方法》即为强制性标准。

6. 推荐性标准

强制性标准以外的标准属推荐性标准，在中国，凡是标准代号带有“T”的，均为推荐性标准。国家鼓励企业自愿采用。为鼓励企业采用推荐性标准，国家还采取优惠措施。推荐性标准一旦纳入指令性文件，将具有相应的行政约束力。如中国已发布的主要用于汽车内燃机试验方法的推荐性试验标准有：

(1) GB/T 18297—2001《汽车发动机性能试验方法》；

(2) GB/T 8190.4—2010《往复式内燃机　排放测量　第 4 部分：不同用途发动机的稳态试验循环》；

(3) GB/T 8190.5—2011《往复式内燃机　排放测量　第 5 部分：试验燃料》；

(4) GB/T 17805—1999《柴油机进、排气流量的测量》。

表 1-2　试验时内燃性所带附件

序号	附件名称		试验项目										
			1	2	3		4	5	6	7	8	9	10
			起动试验	怠速试验	功率试验		负荷特性试验	万有特性试验	压燃机调整特性试验	机械损失功率试验	各缸工作均匀性试验	机油消耗量试验	活塞漏气量试验
					总功率	净功率							
1	进气部分	空气滤清器、进气消声器及连接管道	△	△	○	△	○	△	○	×	△	△	○
		进气、混合气预热	△	△	○	○	△	△	×	○	△	△	△
		曲轴箱通风装置	△	△	△	△	△	△	○	○	△	△	×
		燃油蒸发排放控制装置	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	×
2	排气部分	试验室排气系统	×	×	△	×	△	×	△	△	×	△	△
		排气连接管道、消声器及尾管	△	△	×	△	×	△	×	×	△	×	×
		排气再循环装置	○	○	○	○	△	△	○	○	△	△	○
		二次空气装置	○	○	△	△	△	△	×	×	△	△	△
		催化转化器	△	△	×	△	×	△	×	×	△	×	×
3	冷却部分：水冷机	散热器、护风罩及风扇	△	△	×	△	×	△	×	×	×	×	×
		节温器	△	△	×	×	×	×	×	×	×	×	×
4	电子、电器部分	发电机、调压器及蓄电池	△	△	△	△	△	△	△	×	○	○	○
		发动机系统	△	△	△	△	△	△	△	○	△	△	△
5	传动部分	变速器	△	△	×	×	×	×	×	×	×	×	×

注：×表示不应带的附件；△ 表示应带的附件；○表示可带可不带的附件，按需要任选，但应在试验报告里注明。

这些标准对适用范围、试验目的、名词术语解释和规定、仪表精度及测量部位的要求、计算公式、图标、试验条件、试验方法、试验过程、试验项目和试验报告结果允许差值等都进行了详细的说明，并作了统一规定。试验人员应在试验前仔细阅读有关标准，并按照标准要求严格执行。

1.5.2 试验时对内燃机所带附件的要求

内燃机所带附件不同，所测试的内燃机动力性、经济性等就会不同，因此，标准中对内燃机在进行各项试验时所带的附件进行了规定，如表 1-2 所示。另外标准还有如下规定。

（1）凡属维持内燃机工作所不可少的附件，如进气排气歧管、节气门体、电控系统、燃油输油泵、燃油喷射泵、分电器、水泵、机油泵、增压器、废气放气阀、中冷器以及风冷内燃机的风扇、导热罩等附件一律带上，不列于表 1-2 中。

（2）凡不是为内燃机本身服务且又是外加负载的附件，如排气制动阀门、制动用压气泵、空调用冷气泵、动力转向用液压泵等附件一律不带。若因为结构的原因，不便从内燃机上拆下，其消耗的功率可加到内燃机的实测有效功率中去，或从机械损失功率中扣除。

参考文献

[1] 欧阳明高，田硕，徐梁飞. 汽车动力的混合化发展趋势与构型分析[J]. 汽车工程，2008，30(9)：742-747.
[2] 张冬梅，张树勇，裴伟，等. 国外发动机试验测试技术最新进展[J]. 车用发动机，2013，6(3)：1-4.
[3] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 2 版. 北京：清华大学出版社，2005.
[4] 虞鸿祉. 工业试验设计技术[M]. 南京：东南大学出版社，1990.
[5] 沈邦兴. 工业试验设计[M]. 北京：测绘出版社，1990.
[6] 栾军. 现代试验设计优化方法[M]. 上海：上海交通大学出版社，1995.
[7] 李杰敏. 汽车拖拉机试验学[M]. 2 版. 北京：机械工业出版社，1994.
[8] 何耀华. 汽车试验学[M]. 北京：人民交通出版社，2005.
[9] 黄海燕. 汽车发动机试验学教程[M]. 2 版. 北京：清华大学出版社，2016.

第2章 内燃机台架试验系统

在汽车用内燃机的研究和开发过程中，由于影响因素非常复杂，只靠模拟计算很难获得精确的结果；同时在内燃机制造、使用、服务、维护、修理等生命周期的全过程中，内燃机试验均起着很重要的作用。通过试验可以检查内燃机出厂产品、使用和维修等过程中是否达到设计、使用要求。因此，有效的内燃机试验测试技术就显得格外重要。而先进的内燃机试验测试系统是保证内燃机进行开发和试验研究的基础。随着计算机技术、传感技术、信息技术和自动控制技术的发展，内燃机试验测试系统更加完善，不仅简化了试验操作，而且在试验功能、试验精度等方面都有了很大扩展和提升，测试设备的可靠性也有了很大提高。

通常，内燃机试验是在内燃机实验室内试验台架上进行的。内燃机实验室一般包含试验间、控制室两部分。实验室内的试验系统主要由试验测试系统和实验室环境系统两大部分组成。测试系统主要由保证内燃机运行的燃料供应系统、空气供给系统、冷却系统和对内燃机进行加载的装置——测功机、控制系统及数据采集系统组成；实验室环境系统主要包括通风系统、内燃机进排气系统和消声与隔声系统、安全系统，以保证内燃机在所需的正常的环境中运行，避免室内外噪声和排放物的污染。试验系统的控制部分、数据采集处理系统（也有部分放在实验间）及操作界面放在实验室的控制间内。为保证内燃机试验研究的需求及试验系统的正常工作，内燃机实验室的设计及测试设备的配置非常重要，尤其是在为解决关键技术的验证、测试、优化、调整等方面，实验室所具备的试验测试能力就显得尤为重要。为此，很多内燃机厂商及研发机构均在建立试验及测试能力方面不惜投入巨资。

内燃机实验室设计、建造是一个系统工程，它是集机器、仪器、油、气、电、循环水、采暖、通风、照明、天车、压缩空气、安全系统、隔音降噪和辅助设备于一体，所有这些都必须作为一个整体来运行。内燃机实验室设计不是本书的重点，但它是保证内燃机试验能有效进行的基础。读者如想了解，可参考文献[1,2]及其他相关资料。

图 2-1 所示为内燃机实验间布置简图，图 2-2 所示为某汽车内燃机实验间实图。

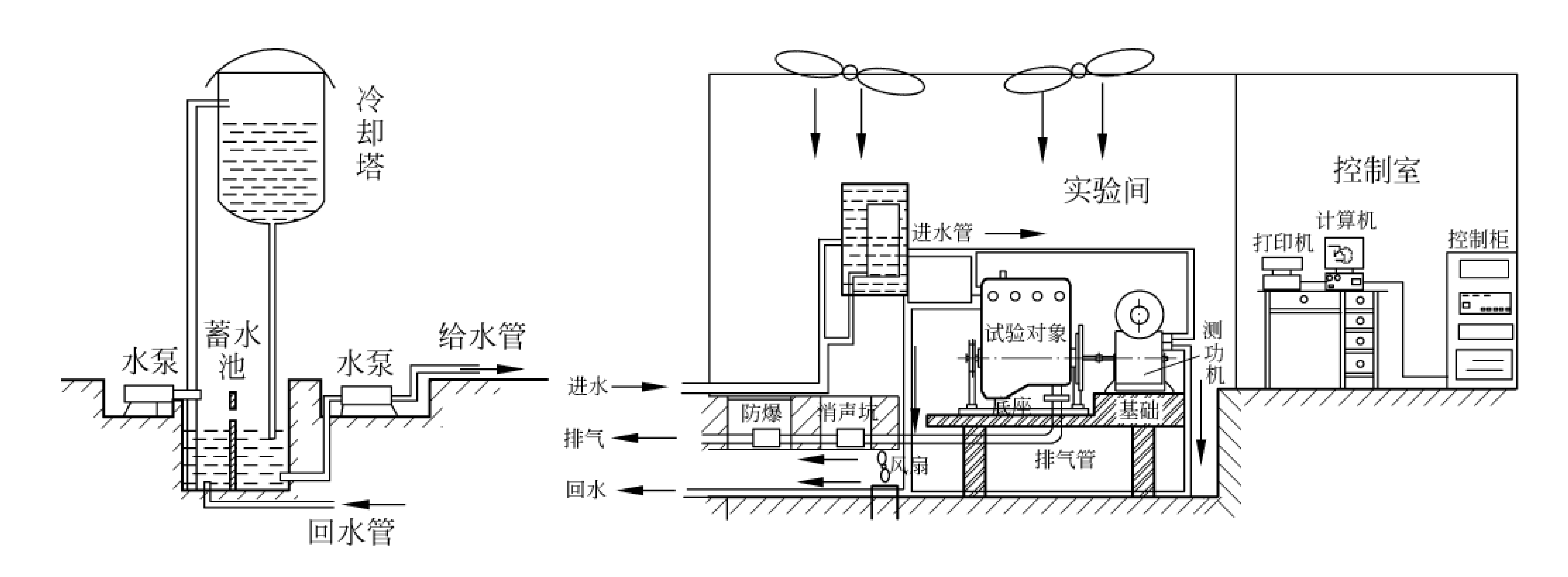
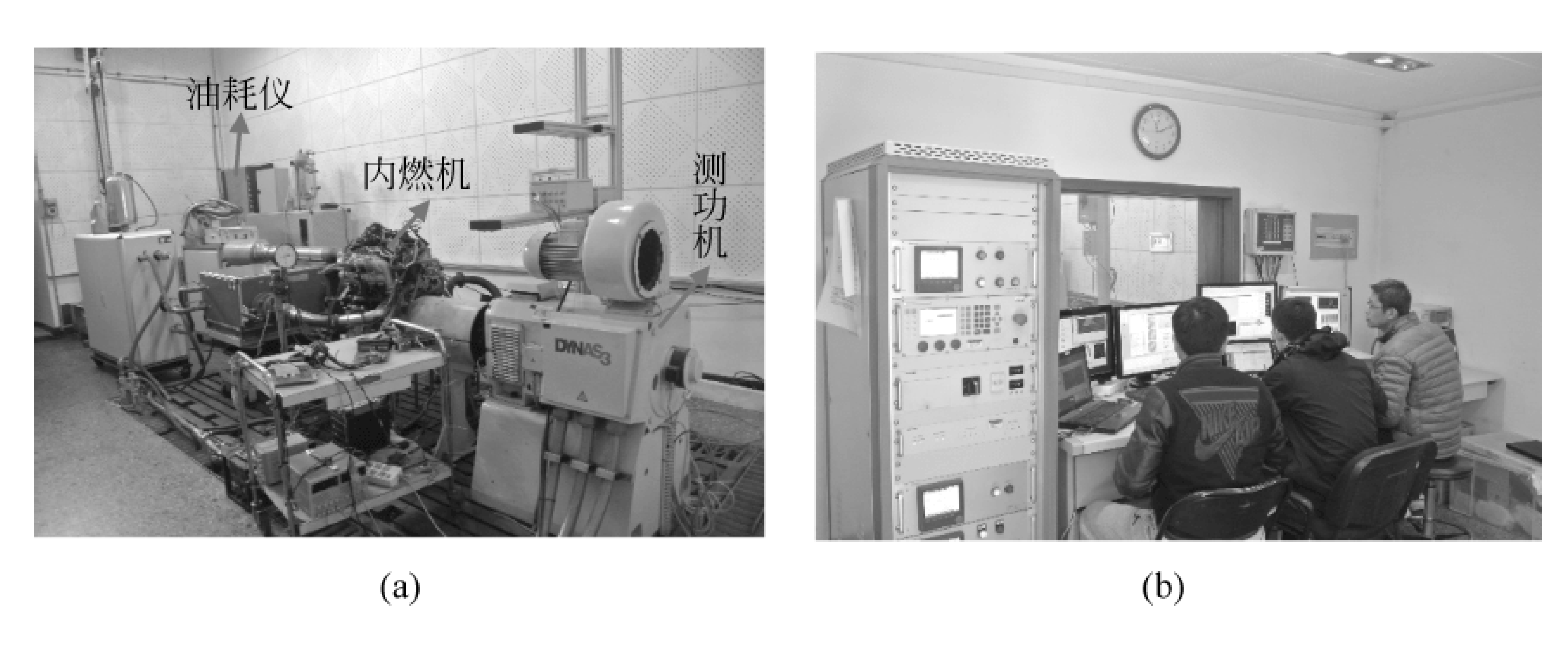


图 2-1　内燃机实验间布置简图



(a)　(b)

图 2-2　汽车内燃机实验间实图
(a) 内燃机实验间；(b) 内燃机控制间

2.1　测试系统

2.1.1　加载与测量装置——测功机

在内燃机产品研发、生产制造、品质管理以及维修保养的各个环节，都需要检测内燃机的各种性能参数和特性曲线。检测的前提是保证内燃机在所需工况下正常运行，为此要给被测内燃机加上模拟的负载，控制并吸收内燃机输出的能量，通过所测得的扭矩及转速算出内燃机输出功率，如果同时测得内燃机的小时耗油量，即可计算出内燃机的比油耗。这样，就可以测得内燃机的动力性、经济性。用于内燃机试验的加载及测量装置叫测功机(器)。它主要包括三部分：一是用于吸收内燃机功率的加载装置；二是负载调控装置，用来改变测功机的制动负载特性并与被测内燃机的动力输出特性相匹配，以形成所需测试工况；三

是扭矩、转速测量装置，从而获得功率值。

测功机也称测功器（下文均写成测功机），它不仅用于测试内燃机的功率，也可作为齿轮箱、减速机、变速箱的加载设备，用于测试它们的传递功率。

1. 测功机的种类及结构原理

内燃机将其输出的机械能传送给测功机，根据吸收原动机的能量所转换的形式，可将测功机分为水力型、电涡流型和电力型三大类；如按扭矩测定方法进行分类，可分为摆动型测功机和传动型测功机（扭矩测量装置或称扭矩传感器被装在内燃机与制动装置之间，与传动轴同轴。有关扭矩测量方法详见第 3 章）。

在上述三大类型测功机中，水力型及电涡流型测功机最终是将所吸收的能量转变为热能，由冷却水带走。被加热的冷却水通过冷却塔冷却后，再循环使用，以保证测功机的可靠运行；电力测功机（如直流、交流测功机）则将吸收的能量变为电能再反馈到电网中加以利用。对于应用于稳态测试的测功机，大都将其外壳做成可自由摆动（浮动）的形式，工作时直接测量外壳所承受的反作用力来确定扭矩（详见后文）。在进行内燃机动态测试时，由于动态响应要求很高，通常用装在传动轴上的扭矩传感器直接测定内燃机输出轴的扭转变形来确定扭矩。有关扭矩传感器的工作原理将在 3.1.2 节中介绍。

下面对常用的三大类型测功机的结构原理进行简要的介绍。

1）水力测功机

水力测功机是以水作为工质，利用固、液体之间相对运动的摩擦力，将内燃机的机械能转为热量，由循环水吸收并带走的一种液力测功装置。

根据转子的结构不同，水力测功机可以分为多种形式，如销钉式测功机、盘式测功机、涡流型水力测功机等。如按工作原理来分，除了盘式测功机外，其他所有水力测功机的工作原理都是类似的。图 2-3(a)所示为某涡流型水力测功机外形结构示意图。它主要由机体部件、测力机构部件、进排水部件、校正部件、电动调节排水阀部件、自动调节装置部件、润滑部件等组成。

其机体部件的基本结构简图如图 2-3(b)所示。主要由一架于滚动轴承上的可摆动的外壳和架于主轴上的转子所组成。测功机转子安装于主轴中间，左右侧壳及左右轴承外壳分别对称安装于转子两侧，转子凹坑与左右侧壳凹坑形成工作腔。当动力机通过联轴节带动测功机主轴上的转子组件同步旋转，搅动工作腔的水时，由于转子旋转所产生离心力及转子凹坑的作用，水在侧壳与转子凹坑之间产生强烈的水涡流。它给外壳一转动力矩，使动力机的转矩由转子传给外壳，装在外壳壳体上的动力臂也随着产生转动趋势，从而将制动力矩传给与制动臂连接的拉压力传感器，通过电子数显装置显示其制动力矩的大小。

测功机通过电动排水阀控制蝶阀开度，或通过自动调节装置控制排水执行器，由排水执行器控制蝶阀开度，以改变测功机工作腔内水的压力，从而改变吸收功率的大小。同时测功机的转速可由转速传感器测得，在电子显示仪器上显示出来。

注：扭矩或称转矩，标准——GB/T 18297—2001 用“扭矩”表示，内燃机原理书用转矩，本书统一称扭矩。

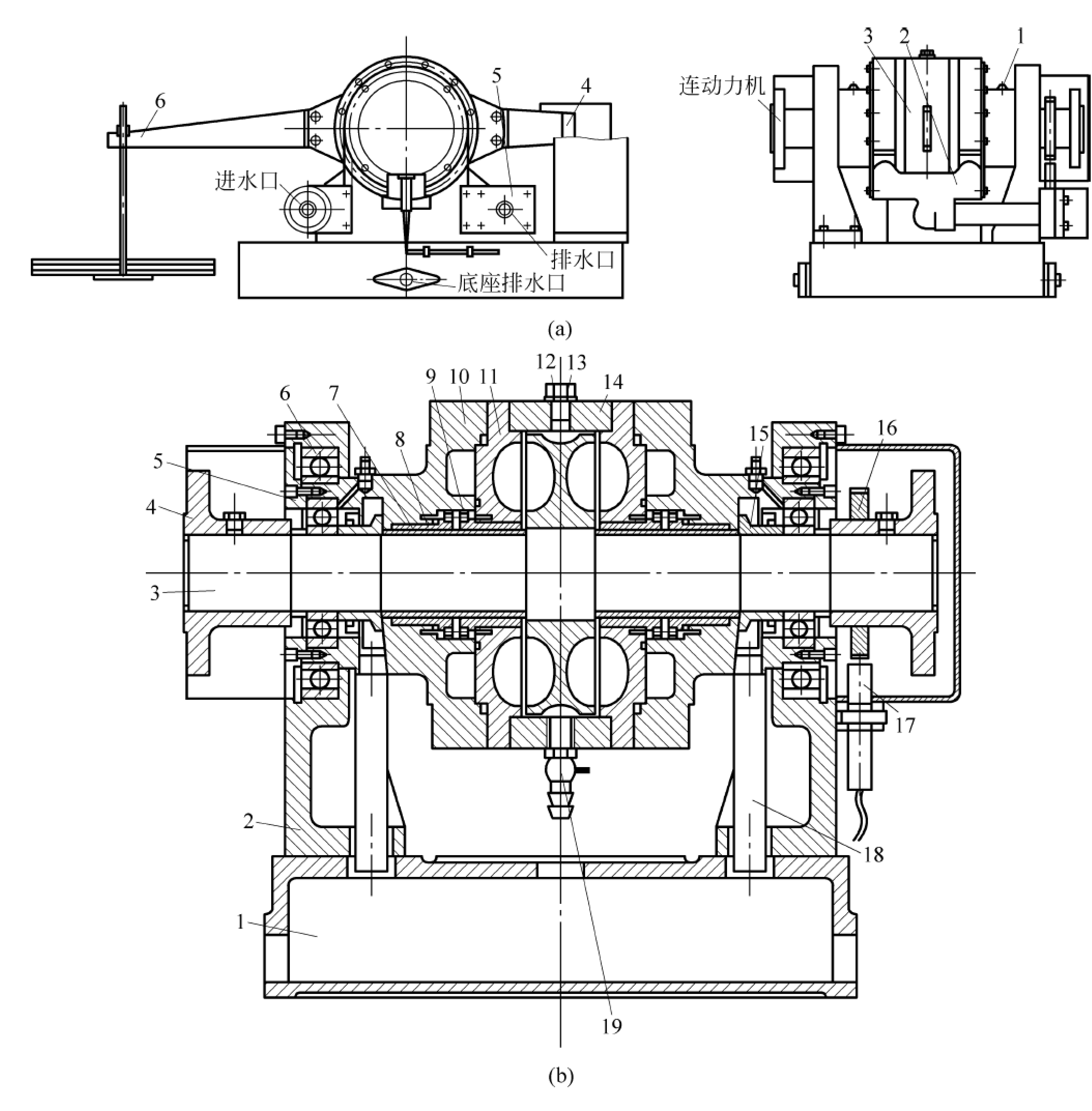


图 2-3 某涡流型水力测功机的外形与结构

(a) 外形图

1—润滑部件；2—进水部件；3—机体部件；4—测力机构部件；5—电动排水阀部件；6—校正部件

(b) 结构图

1—底座；2—左右轴承座；3—主轴部件；4—联轴节；5—轴承压板；6—骨架油封；7—轴套；8，9—双金属轴套；10—左右轴承外壳；11—左右侧壳；12—螺塞；13—转子；14—外壳；15—封水圈；16—测速齿轮；17—转速传感器；18—溢水管；19—旋塞

动力机输出的机械能在这里转化为热能，并由进入壳体中的冷却水吸收而排出带走，极少部分则由测功机外壳壁散热给空气。

为保证测功机的正常运转，测功机出水温度一般在 60℃左右（不同的产品会有所不同，如有的产品要求在 75℃以下），以免产生气泡，使阻力矩急剧变化，影响工作的稳定性。测

功机冷却水温度高，容易在测功机水腔和冷却水管路内结水垢，影响冷却水流量和测功机正常工作。如经常清理水垢则会影响试验效率，冷却水软化是防止结垢的有效手段之一。测功机的结构是否合理，冷却水路的压力、流量是否足够，也是防止结垢的重要因素。

水力测功机结构相对简单、体积小、制造成本低，曾在汽车内燃机企业中广泛使用。相对盘式水力测功机，涡流型水力测功机低速时较稳定，因此目前主要用于大型内燃机加载测试；虽然盘式测功机低速性能比较差，但其转速可以设计得很高，因此，适合于燃气轮机的加载装置。

对于车用内燃机试验，因要求较高的动态响应，而水力测功机因动态响应慢等问题，目前已被电涡流测功机、电力测功机所取代。

水力测功机企业主要有 Horiba 公司（原德国申克公司）、奥地利 AVL、英国 Hofmann、中国杭州奕科、江苏联通、江苏启测、洛阳凯迈、湖南湘仪等。

2）电涡流测功机

电涡流测功机利用了电磁感应原理，形成扭矩和消耗功率，即旋转时引起磁路中磁通变化，从而产生电涡流来吸收内燃机的功率，能量以热的形式传递到水中，再由冷却水带走。其结构简图如图 2-4 所示。

电涡流测功机主要由旋转部分（感应体）、摆动部分（电枢和励磁绕组）、测力机构和矫正部分组成。

感应体由实心磁性材料制成，其外圆有齿槽。电枢由实心低碳钢制成，其内圆装有涡流环。涡流环由导磁性能良好的材料制成。电枢上装着励磁绕组，其轴线与转子轴同轴（即轴-轴线一致）。当励磁绕组通上直流电流后，则围绕励磁绕组产生一闭合静态磁通。

由于转子盘和摆动体都是由磁性材料制成，磁阻很小，所以磁通密度主要取决于气隙的大小。因转子外圆有齿槽，当感应体被原动机带动旋转时，气隙磁密随感应体的旋转而发生周期性的变化，在涡流环孔壁表面及一定的深度范围内将感应涡流电势，并产生涡流，该涡流所产生的磁场又与气隙磁场相互作用，就产生了制动转矩。该转矩通过外环及传力臂传至测力装置上，从而实现测量扭矩的目的。

电涡流测功机易于调节负荷，只要改变励磁线圈的电流即可。

电涡流测功机的优点是：运转平稳，转动惯量小，体积小而吸收功率大，成本低于电力测功机，测试工艺比较成熟。它是目前内燃机厂、研发机构主要使用的测功机之一。

论其缺点，电涡流测功机与水力测功机一样，只能吸收内燃机的能量，将其全部转化为热量消耗而不能回收，也不能倒拖内燃机运转；而热量又是通过冷却水带走，因此，需通入足够的冷却水，并且还需进行软化处理，以免产生水垢堵塞冷却水通道。由于水可能会导致设备的腐蚀，还易受不利的冷却冲击，因此，出水温度不宜过高，一般在 50℃以下（读者可参考相关产品说明书），当水温超过规定值（如 60℃）后，会加速零件的腐蚀和积垢，严重时会损坏测功机。由于上述原因，使得电涡轮测功机精度的提高和实际应用受到限制。

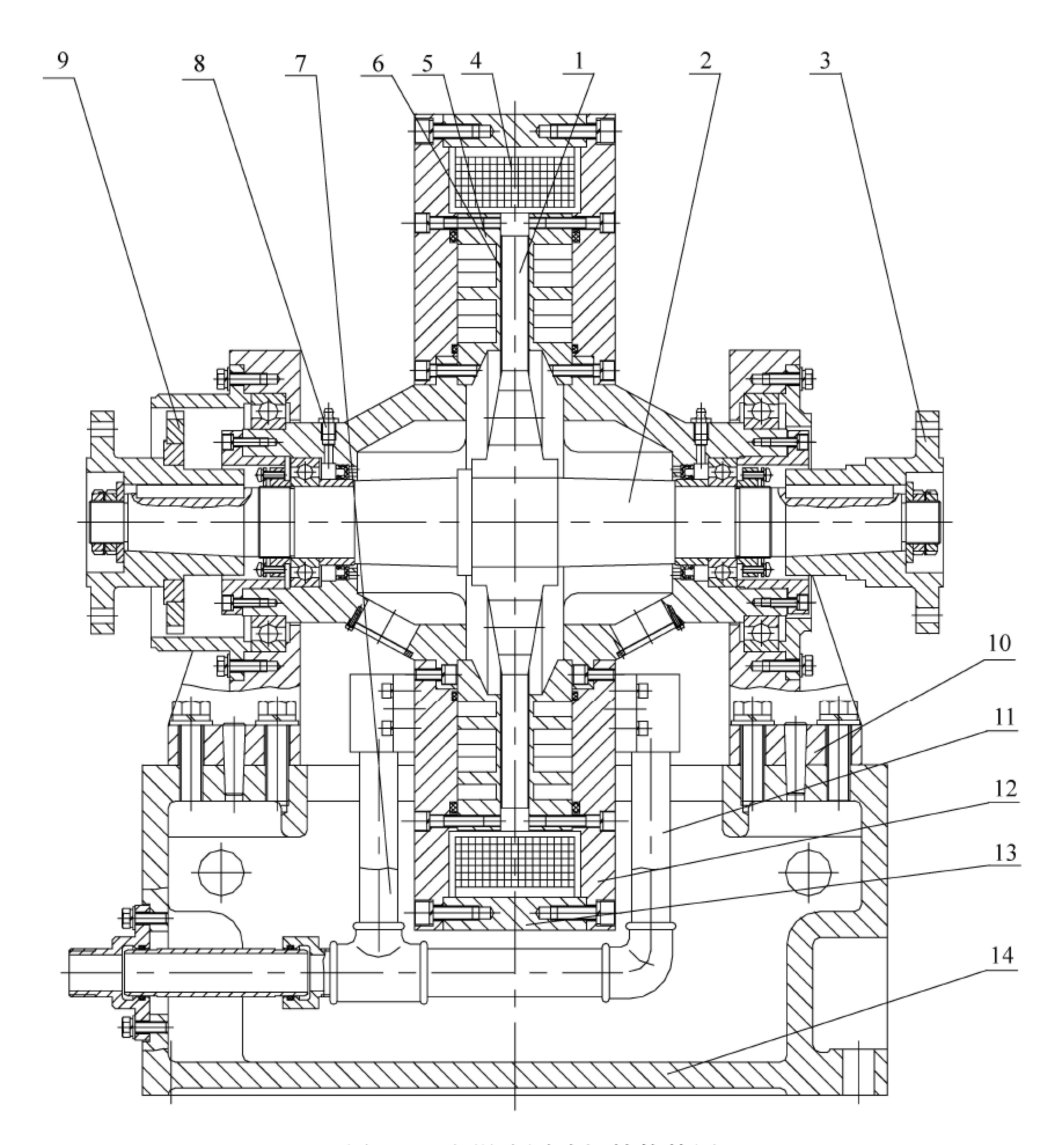


图 2-4 电涡流测功机结构简图

1—感应器；2—主轴；3—联轴器；4—励磁线圈；5—冷却室；6—气隙；7—出水管道；8—油杯；9—测速齿轮；10—轴承座；11—进水管道；12—支撑环；13—外环；14—底座

3）电力测功机

电力测功机的原理与普通发电机基本相同，即把内燃机的机械能转换为发电机的电能，发电机就起到制动机的作用。尽管原理基本相同，但因各自使用工况不同，因此测功机和发电机的机械结构和一些零件使用的材料（如轴承）是不同的。

与上述两种测功机相比，电力测功机的显著特点是其吸收的功率被转变成电能。生成的电能通过测功机的相关驱动电路输出。发电机及其驱动电路的能量损失以热的形式传递给冷却介质。冷却介质可以是水或气流（用水作为冷却介质可以降低噪声，特别是在进行噪声、振动与声振粗糙度（noise，vibration，harshness，NVH）测试中，水冷方式更受欢迎）。

根据电机工作方式的不同，可分成直流电力测功机或交流电力测功机。

(1) 直流电力测功机

直流电力测功机作为电动测功机，历史悠久。图 2-5 所示的是早期的摆动型电力测功机结构简图。它与一般电机主要的不同之处是定子外壳被支撑在一对轴承上，并可以绕轴线自由摆动。在定子外壳上固定一个力臂，它与测力机构连接，用以测定扭矩(对于外壳是固定的电力测功机，其扭矩是通过扭矩传感器获得)。在工作时，内燃机带动直流电机的转子旋转而发出直流电，再经可控硅装置变成交流电，并反馈到电网中去。通过测量电机的电流与电压值也可算出负载功率和阻力矩。由于直流电机的可逆性，外部电网中的交流电经过可控硅控制装置变成直流电，再使测功机变成电动机，这样可倒拖内燃机旋转，以测定内燃机的摩擦功(不给内燃机供油)，也可以起动内燃机运转。改变电机磁极的磁场强度(对发电机)或端电压(对电动机)，便可改变电机的功率。

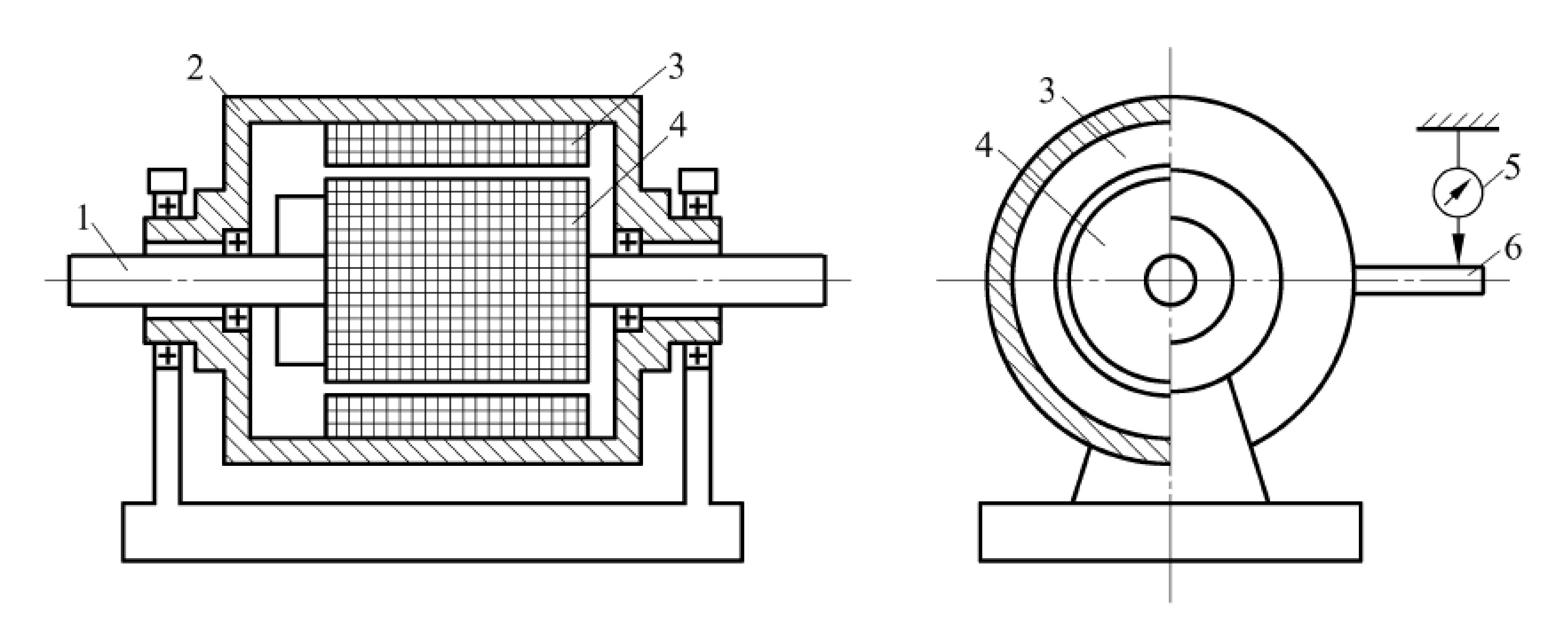


图 2-5　直流电力测功机结构简图

1— 转子；2—定子；3—励磁绕组；4—电枢绕组；5—测力机构；6—力臂

直流电力测功机的优点是负荷和转速调节范围广，工作(况)稳定，测量和控制精度高，而且内燃机能量还可以再利用。然而，直流电力测功机结构上存在机械换向器和电刷，因此具有一些固有缺点，如费用高，占地面积大，单机容量、最高电压和最高转速都受到一定的限制等，导致直流电力测功机在大容量、高速测功系统中难以广泛运用。

电力测功机的散热主要由装在测功机上的鼓风机通风冷却。

(2) 交流电力测功机

交流电力测功机(图 2-6)在功能上与直流电力测功机基本一致。它使用交流异步电机或同步电机作为加载设备。交流电机由变频器提供可变频率的驱动电源，并精确控制其扭矩和转速。与直流电力测功机相比，交流电力测功机不存在换向器问题，因而结构简单，并且交流电力测功机受电网电压的波动影响更小，而且转子部分转动惯量很小，具有优异的扭矩动态响应、高精度的扭矩和转速控制特性、高效节能和高可靠

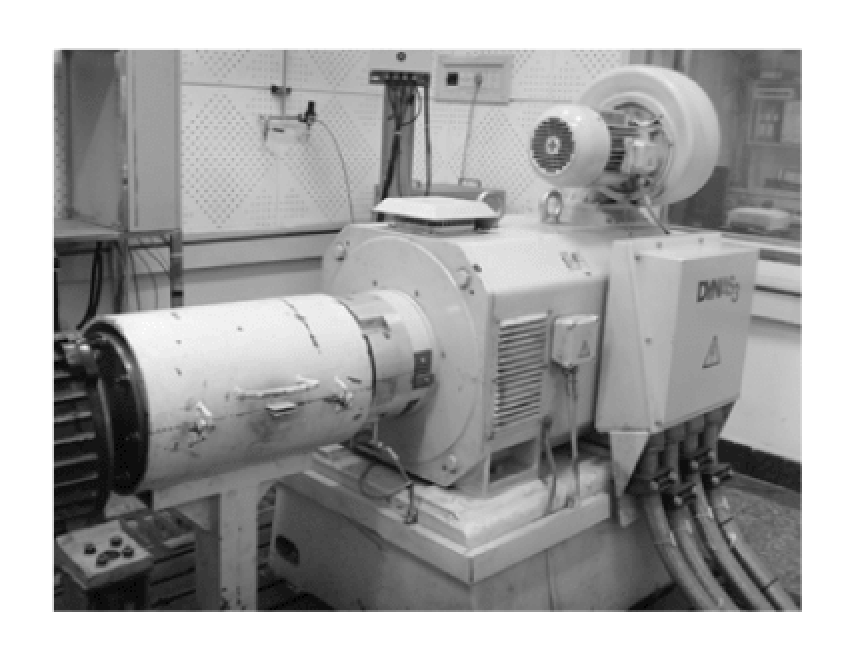


图 2-6　交流电力测功机

性，因此更适合内燃机复杂的动态测试和模拟测试。随着电力电子技术的发展，交流传动控制技术的日趋成熟，交流测功机在内燃机测试领域得到了广泛应用，从简单的稳态测试到复杂的瞬态测试，并能设计出许多传统的机械测功机无法实现的测试方案，如能量回馈等。

主要生产厂家：奥地利 AVL 公司、德国 FEV 公司、日本 HORIBA 公司、法国 D2t 公司、意大利 Ipcom 公司，中国洛阳凯迈、常州常测、江苏联通、湖南湘仪等。

(3) 永久磁铁同步电力测功机

永久磁铁同步电力测功机代表了新一代测功机的发展。与交流电力测功机相比，永久磁铁同步电力测功机的转子用永久磁铁取代，省去了励磁机、自励系统或附加直流电源，因而具有更低的转动惯量。图 2-7(a)示出了其基本结构图，转子是由永久性磁铁制作，三相绕组系统放在定子中。图 2-7(b)是其外形图(由 HORIBA 提供)。

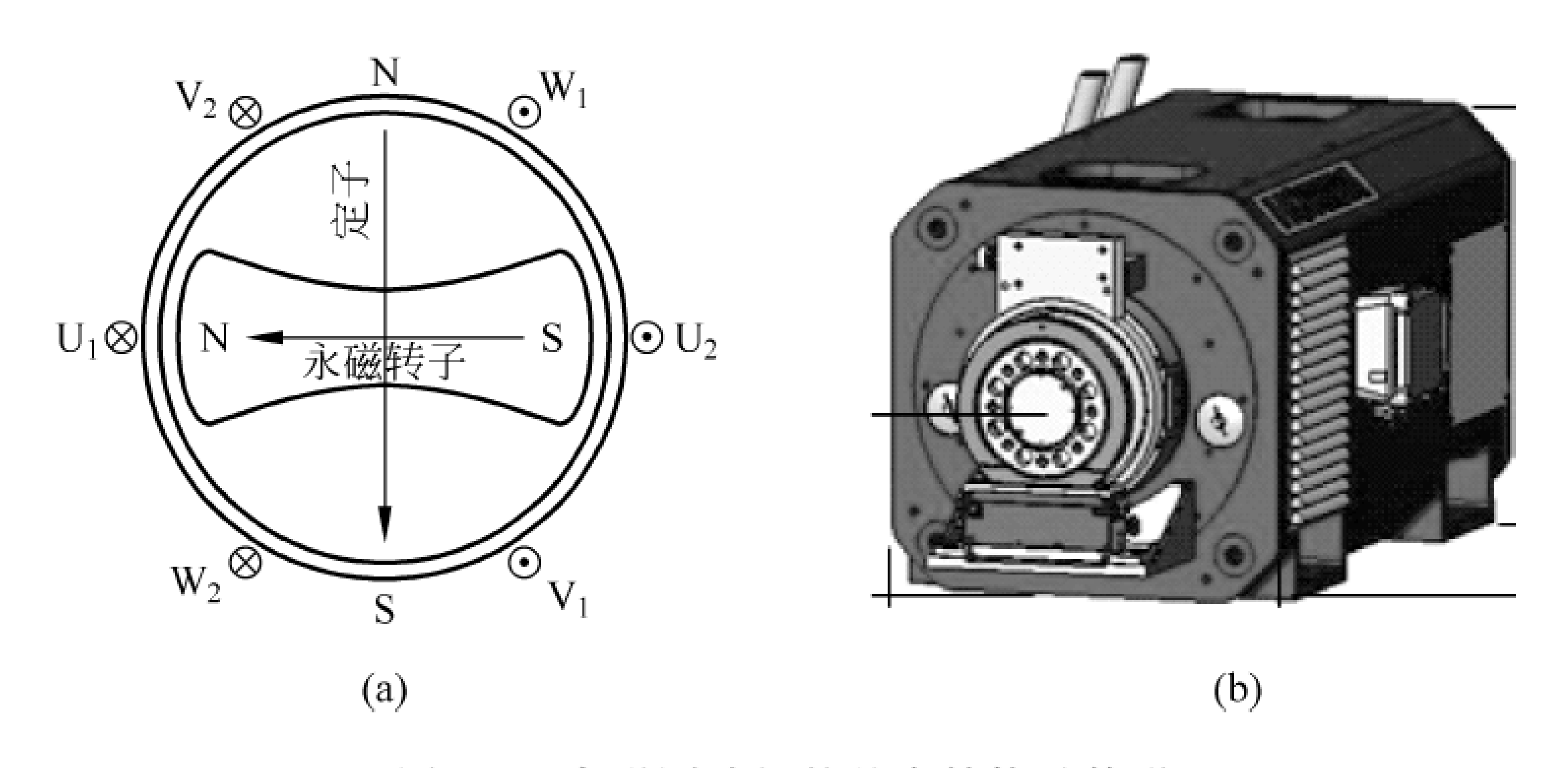


图 2-7　永磁测功机的基本结构及外形

表 2-1 给出了近同功率范围的永磁测功机和交流测功机的主要性能比较，从表中可以看出，永磁测功机具有更小的转动惯量，这样不仅更适合用于测量更小的动力机，还可以非常准确地测试内燃机的起动程序以模拟离合器的开合。更小的转动惯量使得永磁电力测功机非常适合高瞬态测试。

表 2-1　近同功率范围的永磁测功机和交流测功机的主要性能比较

序号	性能指标	某永磁测功机 PM340	某交流测功机 LI350
1	额定功率/kW	346	350
2	额定扭矩/(N·m)	550	750
3	额定转速/(r/min)	6000	4480
4	最大转速/(r/min)	8010	10000
5	转动惯量/(kg/m²)	0.176	0.7
6	加速到标定转速(包括过载情况)的转速梯度/(r/min/s)	35870	11300
7	外形尺寸/(宽×高×长)/(mm×mm×mm)	395×400×694	486×488×847
8	质量/kg	720	1050

基于上述特点，该种测功机多用于车用电机动力测试、车用变速箱开发试验研究中的动力输入模拟（通常是模拟内燃机输出）。

从表 2-1 中可以看出，永磁测功机比交流测功机外形尺寸小，重量轻。

2．测功机的调控与选配

测功机的选配要求：一是测功机的特性与内燃机特性要良好配合，以保证内燃机能稳定运行；二是随着电子控制技术的发展，测功机应能快捷、方便地调整其内部控制参数，改变内部特性，从而扩展其应用范围，提高试验的质量；三是被测内燃机的工况范围应在测功机工作范围（允许运行的工况范围）之内，即内燃机输出的机械能应能全部被测功机吸收，机组运行要安全，而且应处于性能较佳、误差较小的部位。

1）内燃机-测功机机组稳定运行的条件

内燃机油门执行器处于某一确定位置时，内燃机输出一条固定的（功率）扭矩曲线（速度特性线）；测功机负载调节阀（水力测功机为排水阀，电力测功机为控制器，电涡流测功机为励磁电流调节器）处于某一确定位置时，有一条产生阻力的制动负载特性线。如不对两者进行任何调控，要使内燃机和测功机所形成的系统能正常稳定工作，必须同时满足下列两个条件：

（1）内燃机输出特性曲线与测功机制动特性曲线应在测试的工况点上相交，如图 2-8 的交点 A 就是所控制的测试工况点；

（2）当运行工况偏离交点时，系统应能产生回复力（矩），使其快速自动收敛到工作点，而不是发散到其他位置或者不正常地往复摆动。

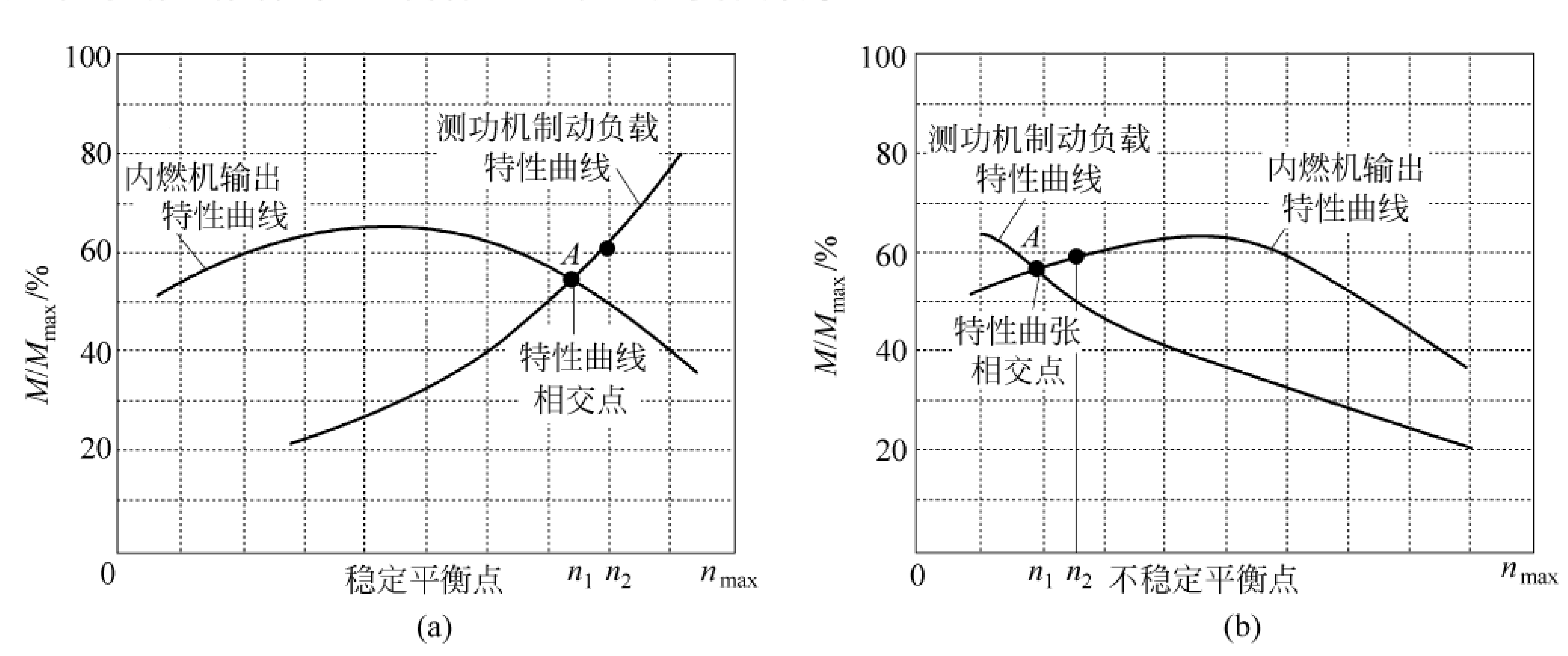


图 2-8　测功机与内燃机特性曲线相交的两种不同情况

图 2-8 为测功机和内燃机特性曲线相交的两种不同情况。从图 2-8(a)中可以看出，当测试工况点 A 处内燃机特性线的斜率小于测功机负荷特性线的斜率时，若因某种原因造成内燃机转速由 n_1 上升到转速 n_2，内燃机的输出扭矩下降；而在同样的转速下，测功机的制动扭矩却将上升。由于此时测功机的制动扭矩大于内燃机的输出扭矩，必将使内燃机的转

速下降而回到原来的交点处，迫使内燃机回到原来工况点的扭矩差即为系统的回复力矩。有这种特性的相交点称为稳定平衡点。而图 2-8(b)中，测试工况点处，内燃机特性线的斜率大于测功机负荷特性线斜率时，情况恰恰相反。当内燃机工况因转速升高而偏离交点时，即升到转速 n_2 时，输出扭矩上升。在同样转速下，测功机的制动扭矩却反而下降。因制动扭矩小于输出扭矩，内燃机的转速不仅不能回到平衡点，反而将继续偏离平衡点，此时系统产生的是偏离力矩。这样的相交点称不稳定平衡点。

2）测功机制动负载特性与内燃机输出功率特性的匹配与调控

在内燃机-测功机机组实际运行中，为获得不同的内燃机特性曲线，如不采取特定的控制模式，会出现上述不稳定运行，或者虽能稳定运行，但是稳定的过渡时间过长以及振动很剧烈的情况(后者常常出现在两条特性线接近平行的情况下)。为此要对测功机特性，有时也要对内燃机特性进行人为的反馈调控，改变特性曲线的走向，达到稳定运转的目的。

进一步说，内燃机的制动负载是由测功机及其控制回路构成的。测功机在不同的控制模式下运行，即意味着为内燃机提供了不同的制动负载特性。对内燃机而言，内燃机台架油门执行器控制与内燃机的配合改变了内燃机的输出负载特性。油门执行器控制回路运行于不同的控制模式使内燃机具有了不同的输出负载特性。因此，要获得内燃机的不同特性曲线，需采用不同的控制模式。测功机常用的控制模式主要有以下 4 种。

(1) 测功机恒扭矩/油门恒位置控制模式(M/P)

在 M/P 控制模式下，油门执行器位置恒定，通过反馈控制使测功机为恒扭矩负载特性，达到图 2-9(a)所示的工况点 A 稳定运转要求。其控制原理为：测控仪给定测功机的扭矩控制值，与测功机反馈的实际测量值进行比较，计算出给定值与测量值的偏差，通过 PID(比例(proportion)、积分(integral)、导数(derivative))自动调节测功机调节阀，将扭矩稳定在给定值附近，获得近于等扭矩的特性线。该模式适合柴油机调速特性试验，因为柴油机调速特性线接近垂直，与测功机(等)恒扭矩特性线接近正交，具有极佳的稳定性。

(2) 测功机恒转速/油门恒位置控制(n/P)

在 n/P 控制模式下，油门执行器位置恒定，通过反馈控制使测功机为恒转速负载特性，达到图 2-9(b)所示的工况点 A 稳定运转要求。其控制原理为：测控仪给定测功机的转速控制值，与测功机反馈的实际转速测量值进行比较，计算出给定值与测量值的偏差，通过 PID 自动调节测功机调节阀，将转速稳定在给定值附近，获得近乎等转速的特性线。该模式适合外特性试验，因为外特性线比较平直，与测功机等转速线接近正交，具有极佳的稳定性。

(3) 测功机恒扭矩/油门恒转速控制(M/n)

在 M/n 控制模式下，控制测功机为恒扭矩，同时控制内燃机为恒转速。以测功机被控为(等)恒扭矩特性为主，即扭矩控制优先于转速。其控制原理为：测控仪给定测功机的扭矩控制值和给定内燃机的转速控制值，与测功机及内燃机反馈的实际测量值进行比较，计算出给定值与测量值的偏差，通过 PID 自动调节测功机调节阀和内燃机油门开度，将扭矩和转速稳定在给定值附近，获得测功机与内燃机特性正交的特性线，如图 2-9(c)所示。因为两

个参数同时控制，所以工况点是恒定的。

该控制方式常用于进行内燃机的负荷特性试验，对油泵是两极式调速器的柴油机控制较稳。

(4) 测功机恒转速/油门恒扭矩控制(n/M)

在 n/M 控制模式下，控制测功机为恒转速，同时调节内燃机油门开度的大小使内燃机输出预设的恒扭矩，以测功机被控为等转速特性为主，即转速控制优先于扭矩。其控制原理为：测控仪给定测功机的转速控制值和内燃机的扭矩控制值，与测功机反馈的实际转速和内燃机反馈的实际扭矩测量值进行比较，计算出给定值与测量值的偏差，通过 PID 自动调节测功机调节阀和内燃机的油门开度，将转速、扭矩稳定在给定值附近，获得同样是正交的特性线，如图 2-9(d)所示。因为两个参数同时控制，所以工况点是恒定的。

该控制方式常用于进行内燃机的负荷特性试验，对油泵是全程式调速器的内燃机控制较稳。

根据使用者需要，还可设置其他控制模式，如测功机为恒转速控制，同时通过调节内燃机油门开度的大小使内燃机进气歧管压力达到预设值(常用于汽油机)。

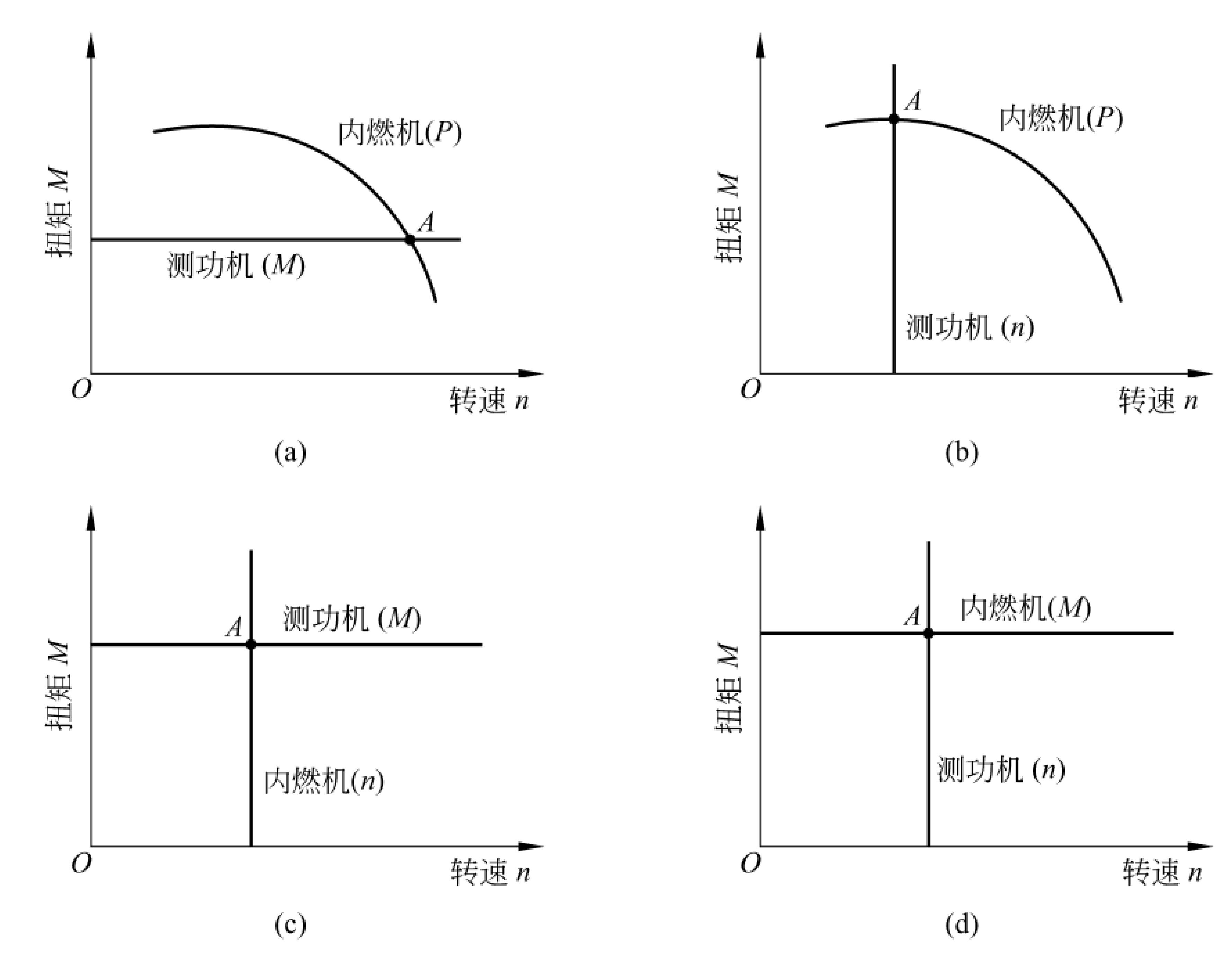


图 2-9　测功机不同控制模式

3) 测功机的选配

选用测功机类型和型号时，在满足稳定运行的前提下，还应遵循以下原则：

(1) 被试内燃机的工作范围(工况面)应在测功机被允许运行的工作范围内并处于性能较佳的位置。

各种类型的测功机都有其被允许正常运行的工况范围。如图 2-10 所示为电涡流测功机允许工作的制动功率范围示意图。在该图所示的 $OABCO$ 封闭曲线中,OA 段表示励磁电流最大时,吸收功率随转速上升的曲线,当功率达到一定值时(A 点),由于测功机热负荷(最高温度)的限制,吸收功率不能继续增加而保持恒定,当近乎恒定的功率保持到 B 点的转速时,达到测功机允许运行的最高转速,即 BC 段为测功机旋转件受离心力负荷或轴承允许转速所限制的最高转速限制线。在无励磁电流时(OC 段),测功机的特性曲线相当于不同转速下测功机的机械损耗特性曲线,这一曲线的下方部分是不能进行有效测试的。

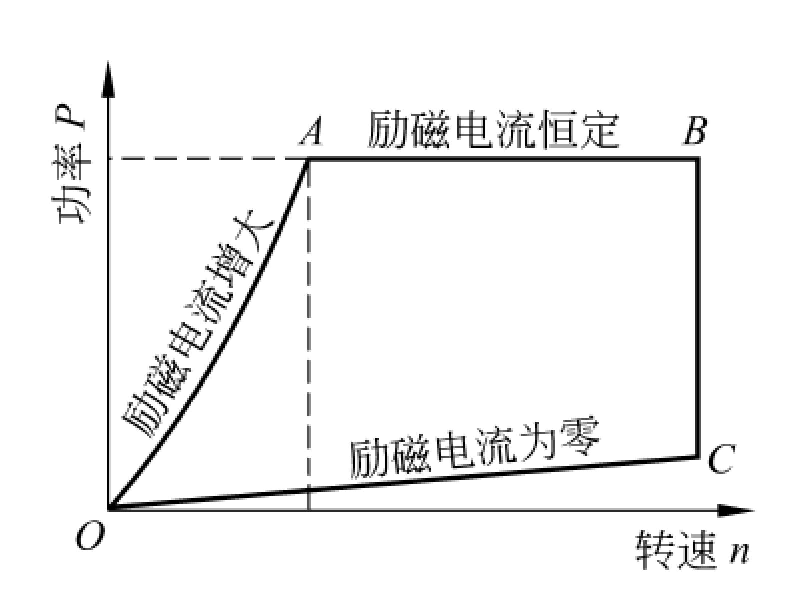
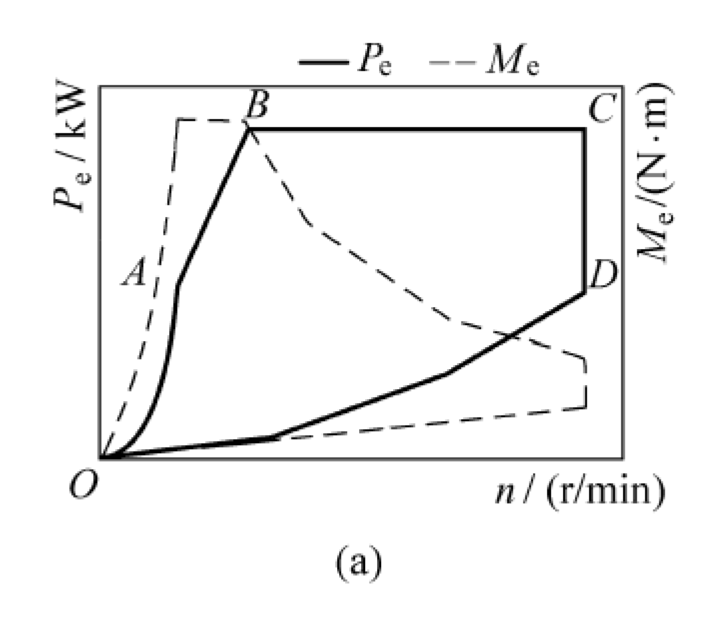
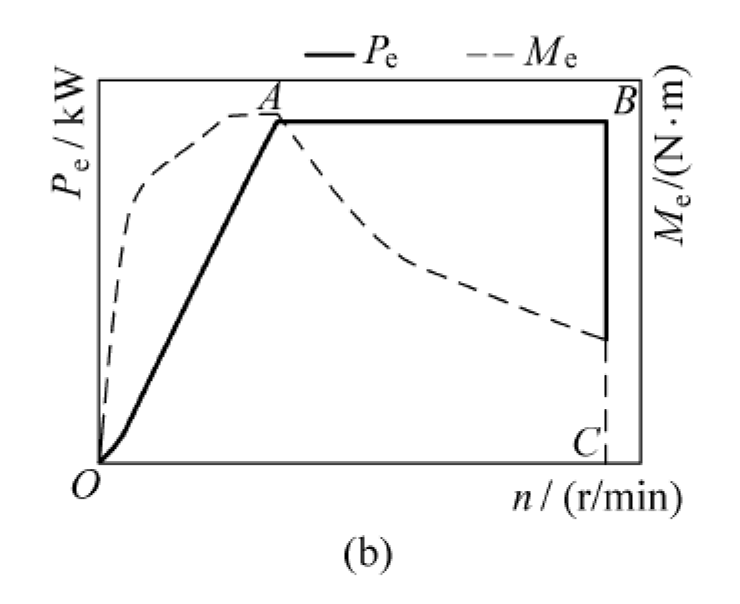


图 2-10　电涡流测功机功率特性图

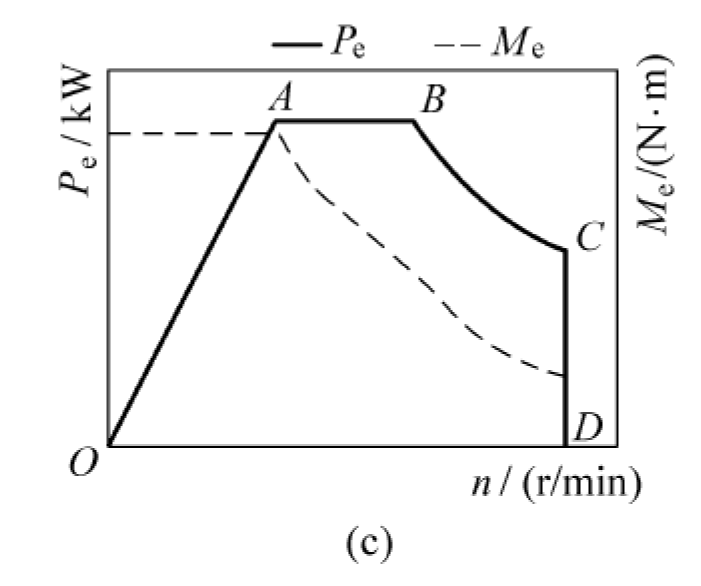
实际中,为保证安全,被试内燃机的最高功率、最大扭矩以及最高转速都要小于上述限值,比如最高功率通常为测功机最大功率的 75%～80%。图 2-11 表示了某种型号的 3 种类型的测功机所允许的工况范围。图中曲线 $OABCDO$ 或 $OABCO$ 所包围的面积,即是测功机所允许吸收功率的范围。相应的内燃机扭矩也要落在测功机扭矩工作范围内。此外内燃机的各项性能指标也不能远远低于上述限值,否则被测值相对测量量程会过小,导致测量误差加大。



(a)



(b)



(c)

图 2-11　3 种测功机工作特性图

(a) 水力测功机;(b) 电涡流测功机;(c) 交流电力测功机

同一类型测功机,按功率和转速范围大小有一系列大小不同的型号。如图 2-12 所示为 HORIBA 公司(原德国申克公司)生产的不同型号的交流电力测功机扭矩、功率特性曲线图。当试验对象——内燃机最大功率在 280 kW,最大扭矩(转矩)在 1020 N · m 附近时,根据上述测功机选择原则,可选型号为 HT350 的电力测功机作为内燃机负载。

(2) 测功机的响应速度和动态特性应满足被试内燃机的要求。

汽车用内燃机对动态响应的要求较高,特别是研究内燃机动态特性时更是如此。目前

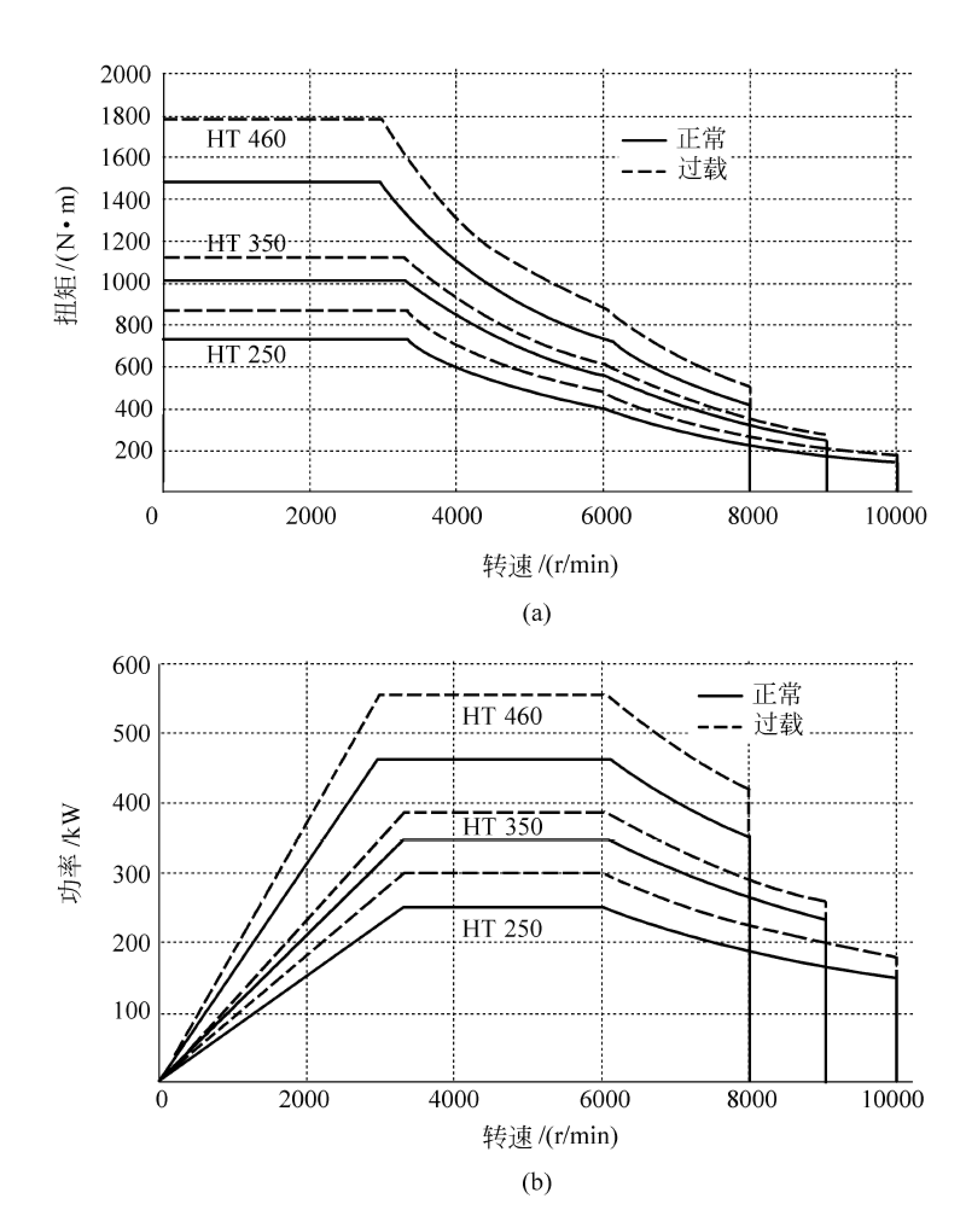


图 2-12　HORIBA 交流电力测功机系列的扭矩与功率范围
(a) 扭矩曲线；(b) 功率曲线

各类测功机中，交流电力测功机惯量较小，动态响应速度高，多用于动态测试的试验研究中。

(3) 在满足性能要求的前提下，应具有良好的性价比。

测功机的选择还与试验台的用途、试验目的、使用条件等因素有关，比如进行可靠性及寿命试验时，考虑到其使用时间很长，条件比较恶劣，尽管各种测功机都能满足其测试要求，但仍以选用成本较低的电涡流测功机使其具有良好的性价比为佳。然而，如使用者条件许可(先期投资资金可以购买电力测功机)，则最好购置电力测功机。如前所述，电力测功机发出的电可以反馈到电网，因而从节约能源的角度考虑，即从整个能源系统来看，在进行内燃机可靠性试验时，使用电力测功机作为负载性价比会更好。

3. 测功机、内燃机机组安装

试验台基础及其上固定的刚性底板用于安装测功机和内燃机，见图 2-1。由于内燃机工作时振动很大，因此试验台架的基础设计、减振/隔振设计、测功机与内燃机的连接及安装都是非常重要的。安装质量将对试验质量和测试精度产生很大影响。

1）台架基础

在台架基础设计时，应注意考虑以下几方面。

(1) 试验台应靠近有水源的一边，基础与墙壁距离不少于 1.5 m，并应注意使测功机距墙壁的距离能满足校正臂的安装，校正臂有一定的长度，是扭矩标定时使用的装置。此外试验台所在的实验室要求通风好，光线足，照明设备符合规定要求。

(2) 为保证测功机与被测内燃机连接的稳定、可靠，测功机与被测内燃机应安装在同一铸铁底座上。安装的水泥基础即台架基础应足够牢固，既能承受静载荷，也能承受动载荷，并要使内燃机试验时的振动降至最低限度。因此，地基基础需用高质量的混凝土浇筑，具体值可参考相关标准。底座的安装面应用水平仪校正，校正精度通常不低于 0.05 mm/m。

(3) 应采取有效的减振、隔振措施，减少试验台振动能量向外界传递，更重要的是需避免在进行所有试验工况时内燃机与台架系统发生共振。以前简单的办法是在混凝土基础下面垫一层黄沙，并在基础四周开(防)隔振槽，用木屑或炉渣充填，沥青盖顶。目前减振隔振方法一般采用隔振(性)基础、弹簧减振，即在铸铁底座和混凝土基础连接后放置在一定数量的减振弹簧上，或者不设置混凝土基础而将铸铁底座直接放置在减振弹簧上。

减振弹簧主要指空气弹簧或阻尼机械弹簧减振器。其各自的主要特点如下：

① 空气弹簧在台架试运转以后，系统能够自调水平，但它需要可靠、低流量、无须冷却的空气供给；

② 阻尼机械弹簧在安装时需要对配重进行水平调平，但它基本可以做到后期无须维护保养。

此外，在进行台架基础减振设计时需要根据内燃机参数合理匹配配重及减振器选型，确保隔振效率等技术参数达到设计要求(如到 95%以上，参考值：垂直固有频率低于 4 Hz，振幅小于 0.05 mm)，同时需要根据试验间大小及试验内燃机大小合理设计减振台面的大小及在试验间内的位置，留出隔振器安装及检修的位置。

(4) 地下埋设线管应在浇注混凝土前进行，内燃机排气管如安装在地下时，则应和线管相距 0.5 m 以上。目前，设计建造试验室时，一般都设有地下室，用来敷设各种管路，这样，试验间比较整洁，同时，管路的检修、维护也方便。

内燃机试验台基础设计要考虑的因素很多，因此是一项专业性很强的工作，通常此项工作委托从事此项工作的设计院(或专门机构)来完成。

2）测功机与内燃机的安装

在紧固测功机地脚螺栓前，需用水平仪校正测功机在两个互相垂直方向的水平度，其安装精度一般为 1/1000，以保证测功机的灵敏度和正确性；内燃机的支架固定在底座

上，支架一般需要 3～4 个。固定内燃机的支架与内燃机之间有弹性减振块。被试内燃机经常变换时，内燃机最好安装在三个自由度均可变位的附件支架上，使安装和调整更方便。

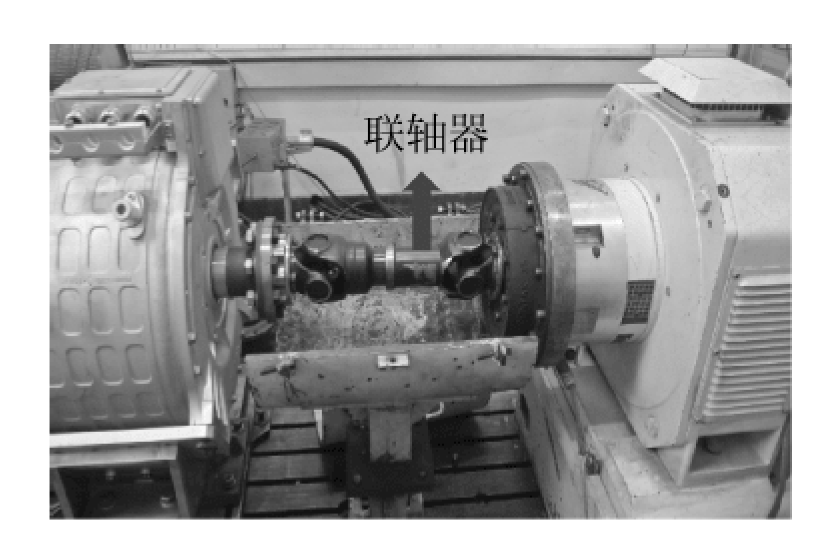
对于用于出厂试验的内燃机试验台架，因被测试的内燃机品种较少，结构相似，连接相似，并且要求安装效率，因此，目前企业一般都采用试验小车，即装配好的内燃机先安装在试验小车上，然后推到试验台，实现快速连接，从而提高安装、检测效率。

内燃机安装油门执行器时，要确保内燃机调速手柄行程在油门执行器行程之内。如果内燃机采用的是电子油门或电信号，则内燃机试验台控制系统应有模拟电子油门系统。

3）测功机与内燃机的连接

内燃机与测功机的连接件一般采用万向联轴器或弹性联轴器。内燃机与测功机连接后，要进行找正工作，以保证旋转轴的同轴度，一般要求同轴度在◎0.05 mm 以内。无论哪种连接方式，要尽可能减少作用于测功机上的附加力矩和轴向力，以免引起发热或发生设备人身事故，无法正常测试。为保证安全，通常在靠近测功机端加装一辅助支座。在内燃机与测功机的联轴器处加装安全罩，以防机件飞出伤人，如图 2-13 所示。

联轴器的选择原则：可靠、安全、轴系匹配（防止轴系扭振）。



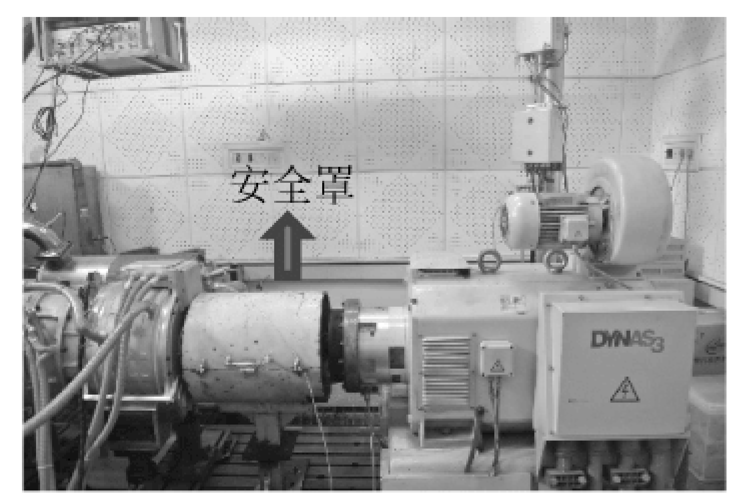


图 2-13　内燃机与测功机连接图

4. 测功机的校正

在内燃机进行试验过程中，测功机主要测量扭矩和转速。为保证测量的准确性，测功机安装完毕后或在特定使用前应进行严格的校正，校准周期可根据使用条件、重要程度以及其自身的稳定性而确定，一般不超过 1 年。测功机校正装置主要包括：一套杆臂和一套相当于测功机满量程的牛顿砝码，砝码精度应为国家标准四等精度砝码或精度更高的砝码。

关于测功机校正方法，用户在购买测功机时，厂家均配有相关说明书，用户需按说明书具体要求进行有关操作。本节简要介绍测功机校正的一般方法。

图 2-14 所示为某电涡流测功机标定装置安装示意图，校正过程主要涵盖以下内容：

（1）在加砝码前先校正仪表的零点；

（2）在杆臂的托盘上加上满量程的砝码；

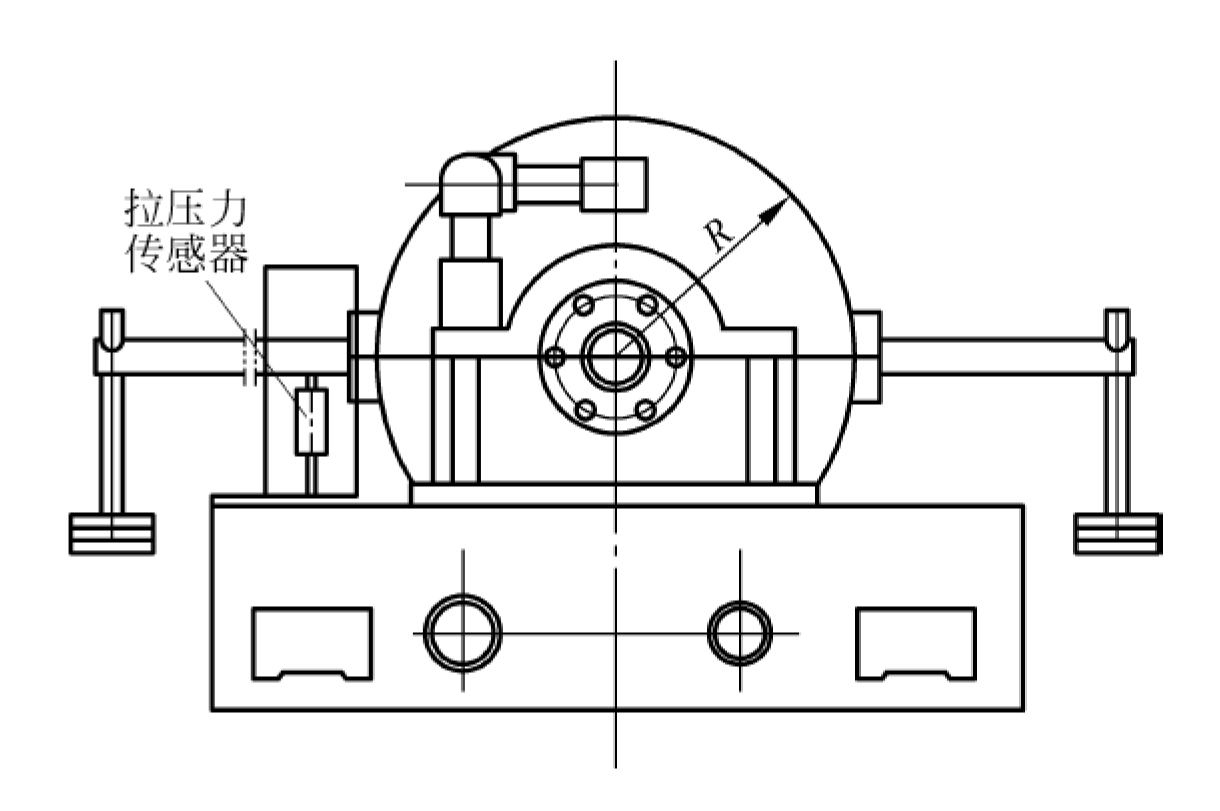


图 2-14 测功机标定安装示意图

(3) 校正仪表的满度；

(4) 减下全部砝码，观察仪表扭矩显示值与砝码的误差；

(5) 依次加砝码至满量程并观察仪表扭矩显示值与砝码值的误差；

(6) 依次减法码至零并观察仪表扭矩显示值与砝码值的误差。

仪表显示值与砝码实际值的读数误差不超过测功机满量程扭矩的 0.2%～0.4%即为合格。

图 2-14 所示的测功机校正方法是在一侧加上砝码后，根据砝码所产生的重力乘以力臂的长度得出扭矩。此种方法适合外壳为浮动式，扭矩采取平衡力法获得的测功机。

然而对于法兰式扭矩传感器(详见第 3 章)，如采用上述方法就会产生误差。这是因为此标定方法没有考虑到砝码的重力最终要作用在扭矩法兰上，而扭矩法兰的内部应变是在扭矩和重力的双重作用下产生的，这样在真正试验时，测量结果难免会产生误差。有一种方法可以消除这种误差，即双臂标定法。下面以 HORIBA 公司对轻型电力测功机采取的双臂标定法为例，简要介绍其方法。图 2-15(a)示出的是测功机双臂标定示意图，图 2-15(b)示出的是双臂标定原理示意图。标定过程主要含以下内容：

(1) 标定臂安装在测功机上之前，使测功机的扭矩法兰完全处于自由状态，然后在控制器端标零点；

(2) 用堵块锁死测功机轴端，使其不能自由转动(见图 2-16)；

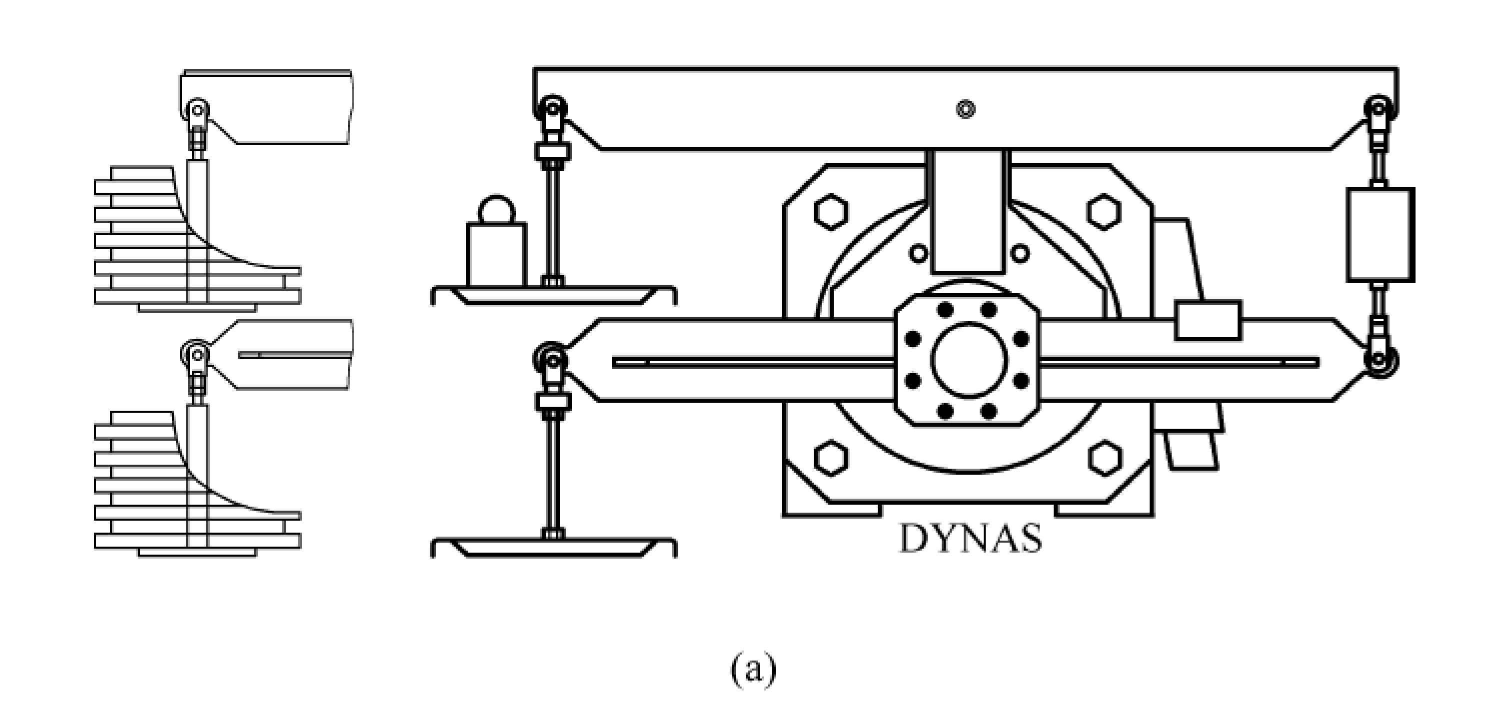
(3) 按照该测功机说明书要求步骤安装标定臂、托盘及配重块等；

(4) 调整游码，使控制器端显示为零；

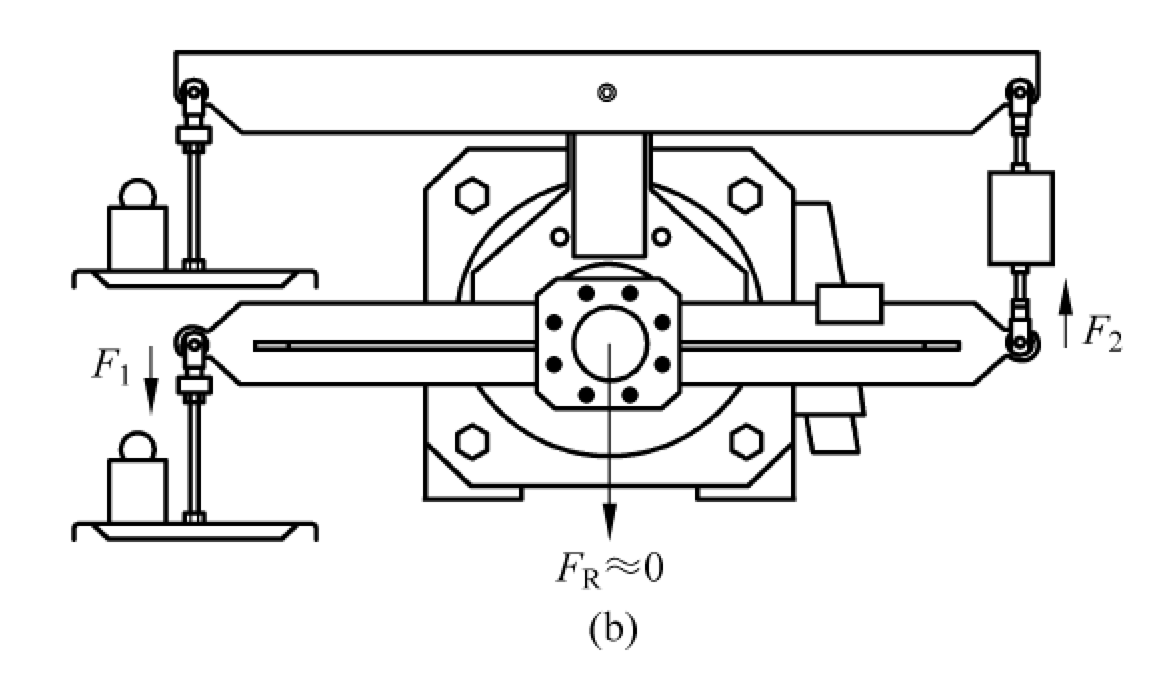
(5) 在上下两个托盘中加入等量的砝码，根据该测功机说明书要求逐步标定。

对于测功机的转速验证，通常只需要用一个在资质认证有效期内的转速仪表测量一下测功机的转速，两者显示转速相一致即可。

本节对测功机的结构、原理、调控与选配、安装及校正进行了简要介绍，更多有关测功机的信息，如测功机如何调试等，读者可参考相关测功机说明书。



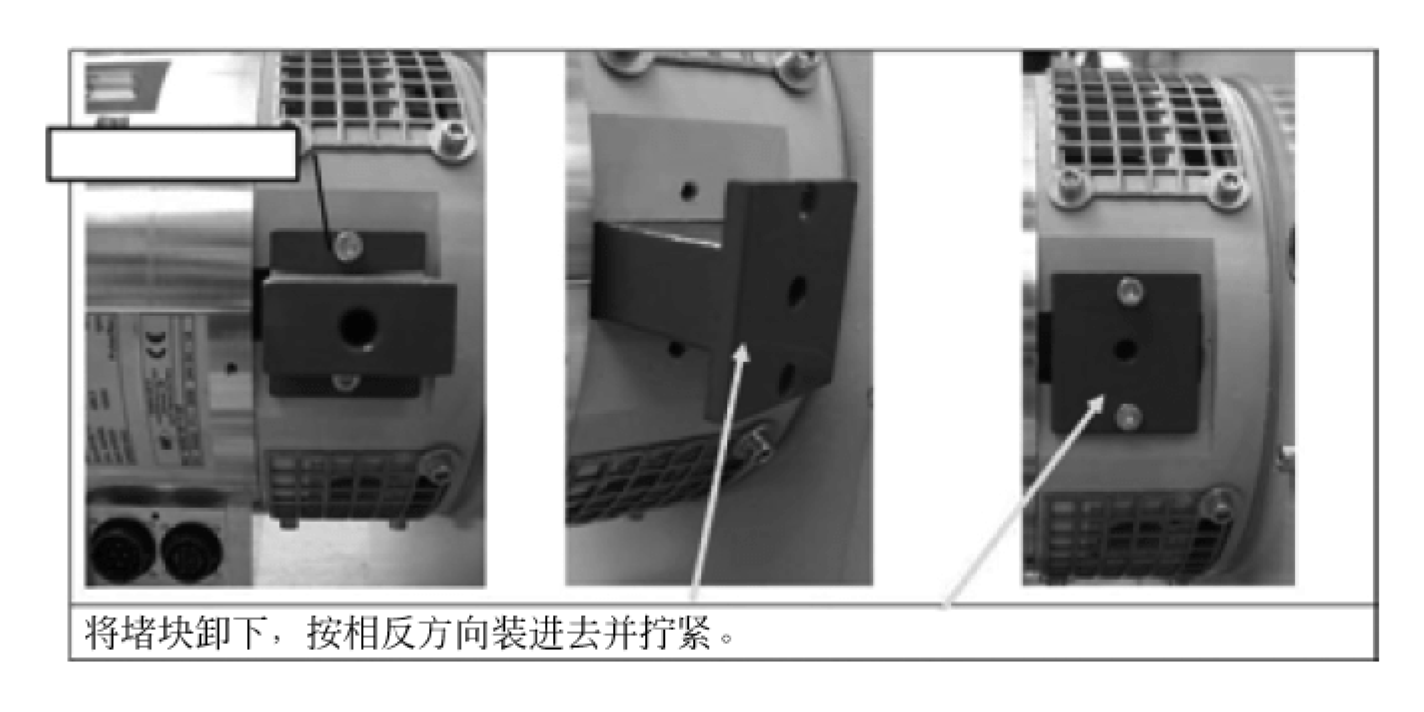
(a)



(b)

图 2-15　双臂标定的示意图及原理

（a）双臂标定示意图；（b）双臂标定原理示意图



将堵块卸下，按相反方向装进去并拧紧。

图 2-16　堵块锁死轴端示意图

2.1.2　数据采集及处理系统

1. 数据采集及处理系统的任务、结构与特点

内燃机进行试验时，数据采集系统的任务就是完成试验台实时数据的采集、记录、处理和输出功能，反映内燃机现场运行特性。试验过程中所需要测量的参数很多，如内燃机的扭

矩、转速、燃料消耗量、燃油温度、润滑油压力和温度、进气压力和温度、排气压力和温度、冷却水的进出口温度等。数据采集系统示意图如图 2-17 所示。

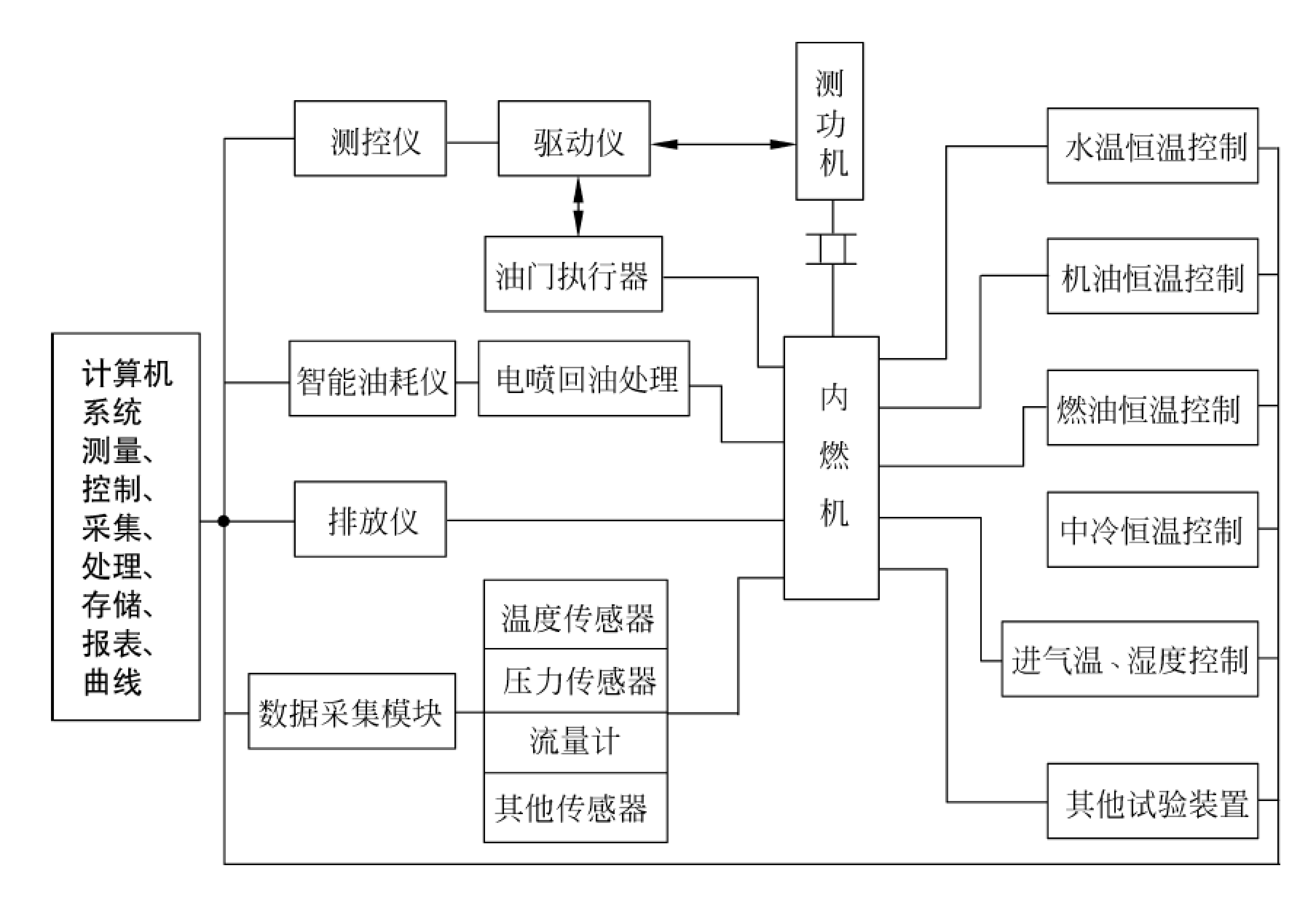


图 2-17　内燃机试验数据采集系统结构示意图

内燃机试验时待测的众多参数大部分是通过各种类型的传感器实时测量的,但有些参数则需根据测量到的参数和公式进行换算得出,如内燃机功率、燃油消耗率。先进的测试系统一般都提供数据的后处理,可按用户要求提供所需数据的最终处理结果,以表格和曲线等形式表示。

目前,在汽车内燃机试验中,有很多非电物理量(后简称非电量),非电量的电测系统成为最常用的采集系统。所谓非电量的电测系统是一种利用电或电子技术的先进手段对各种非电量进行测量的方法。一般都是先把被测的非电量转换为电量,然后经电子仪器予以放大、记录及数据处理。典型的测试过程如图 2-18 所示。

从图 2-18 中可以看出,非电量测试系统主要包括以下几种。

(1) 传感器:将输入的被测非电量转换为电信号。

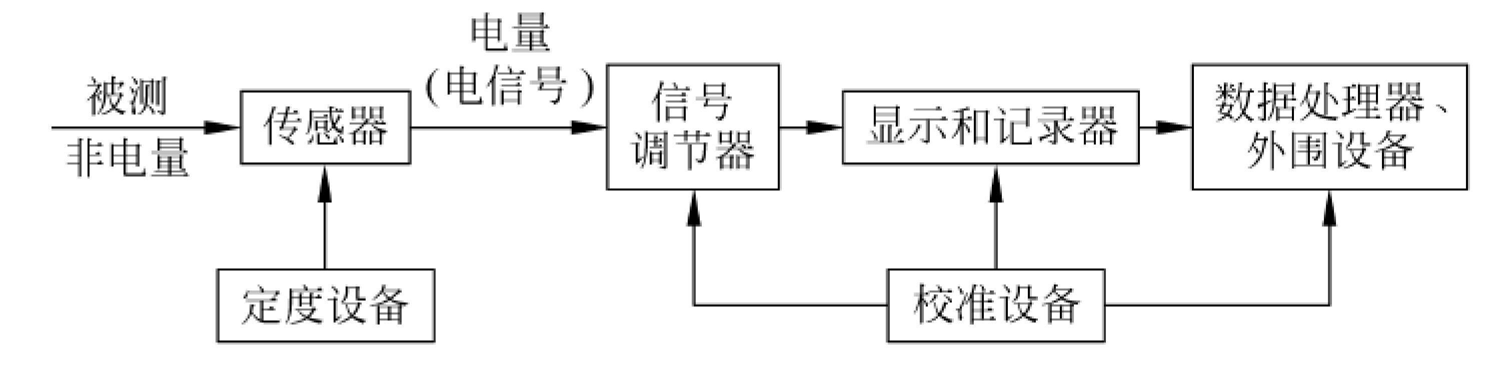


图 2-18　非电量测试系统示意图

（2）信号调节器：将传感器输出的电信号变换成传输不失真，且便于记录、处理的电信号，如信号源的阻抗变换，信号的放大、衰减与波形变换，信号滤波，多路信号切换等。

（3）显示和记录器：显示和记录信号调节器输出的信号。显示必要的数据变化图形，供直接观察分析，或将其保存，供后续仪器分析、处理。

（4）数据处理器：将记录的信号按测试目的与要求提取其有用信息，通过专用计算机进行分析、处理，如概率统计分析、相关分析、功率谱分析和传递特性分析等。

除此之外，非电量测试系统还包括完成数据采集所需的计算机硬件和软件。为保证采集系统的准确性，系统中还有定度和校准等系统附加设备。测试前要对传感器及测试系统确定输入与输出物理量转换关系的定度曲线，并利用一种较高精确度的参考仪器进行校准，以确定整个测试系统的精度。有关这方面的详细内容，可参考文献[3，4]及相关书籍。

此外，由于被测量（被测参数）有静态与动态之分，数据采集系统的基本特性也可分为静态特性和动态特性两类。

内燃机台架试验根据试验目的和任务的不同，所配备的传感器和数据分析处理软件也是不同的。但就整个系统的结构设计思路而言则是差不多的。下面以某重型柴油机排放测试系统为例，对内燃机采集系统的硬件和软件设计及功能进行简要描述。

2．数据采集处理系统的硬件

图 2-19 是某重型柴油机排放测试系统示意图。整个系统中的测试设备包括测功机、油耗仪、空气流量计、环境站（主要指大气温度、湿度、大气压力等）、排放分析仪、定容采样（constant volume sampling，CVS）系统、颗粒采样系统等。主控计算机协调管理这些设备，实现整个试验过程的数据采集、流程控制和数据处理。从图中可以看到主控计算机在整个测试系统中起到关键作用。

测试系统通过传感器和测试设备测量所需各类参数。所需测量的主要参数、相应的传感器或测试设备以及输出接口形式如表 2-2 所示。

表 2-2　测试设备及接口形式

测量参数	测试设备	输出接口
大气压、温度、湿度	大气压力、温度、湿度传感器及数据采集系统	RS-232/RS-485/LAN
温度、压力	热电阻、热电偶传感器、压力传感器及数据采集系统	RS-232/RS-485-LAN
燃油消耗量	油耗仪	RS-232/RS-485/脉冲
进气量	空气流量计	RS-232/RS-485/电压
转速、扭矩	测功机	RS-485/CAN/LAN
污染物浓度	排放分析仪	RS-232/RS-485/LAN
稀释排气流量	CVS 采样系统	RS-232/RS-485/LAN
颗粒取样流量	颗粒采样系统	RS-232/RS-485/LAN
烟度	透光式烟度计	RS-232/RS-485/LAN

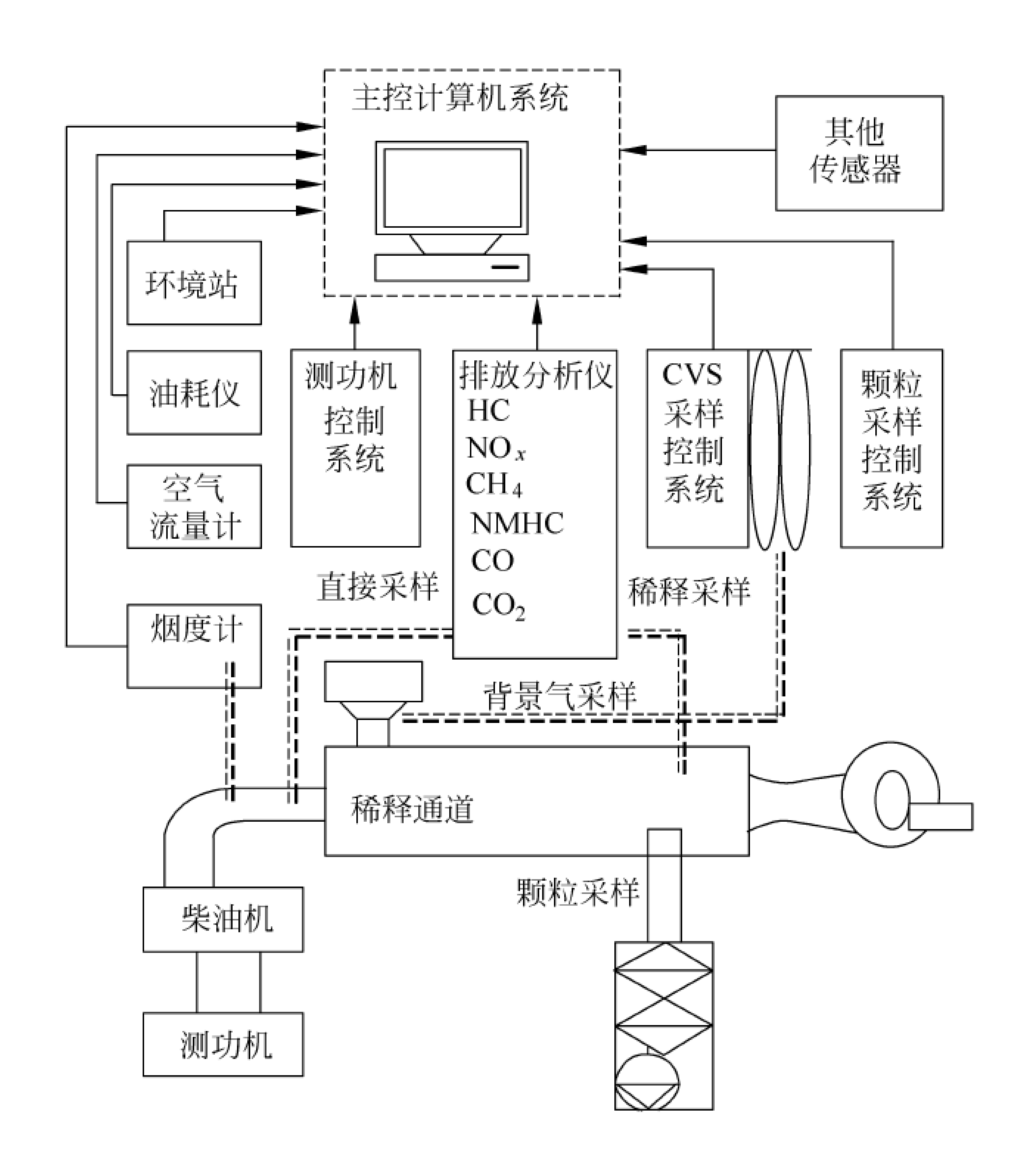


图 2-19 某重型柴油机排放测试系统

由于内燃机排放测试系统中传感器和测试设备较多，输出接口形式多种多样，加之现场内燃机以及各种大功率电子设备干扰较强，为保证系统的可靠性和准确性，主控计算机系统必须具有良好的抗干扰能力，同时需采用工业控制计算机作为主控计算机系统的主机，以保证系统的稳定性。

主控计算机系统硬件设计如图 2-20 所示。系统硬件是基于工业控制计算机(IPC)设计的。基于 IPC 的硬件结构是一种开放式结构，IPC 具有抗干扰、性能可靠、有丰富的软硬件支持、便于升级和扩展等特点。主控计算机通过 ISA 和 PCI 总线接口扩展各种通信接口，包括 485 接口卡、串口卡、GPIB 接口卡以及网卡。通过这些接口卡实现与测功机、油耗仪、排放分析仪等设备的通信。

主控计算机系统通过 485 总线数据采集模块采集各种传感器以及模拟量、开关量和脉冲量信号。现场总线结构的数据采集系统具有结构简单、抗干扰能力强、便于扩展等优点。采集模块包括模拟量模块、热阻模块、热偶模块、开关量模块和脉冲量模块，各个模块通过 RS-485 总线连接在一起，系统采用两位十六进制数编址，总线上最多可连接 256 个模块。通道可以方便地进行扩展。

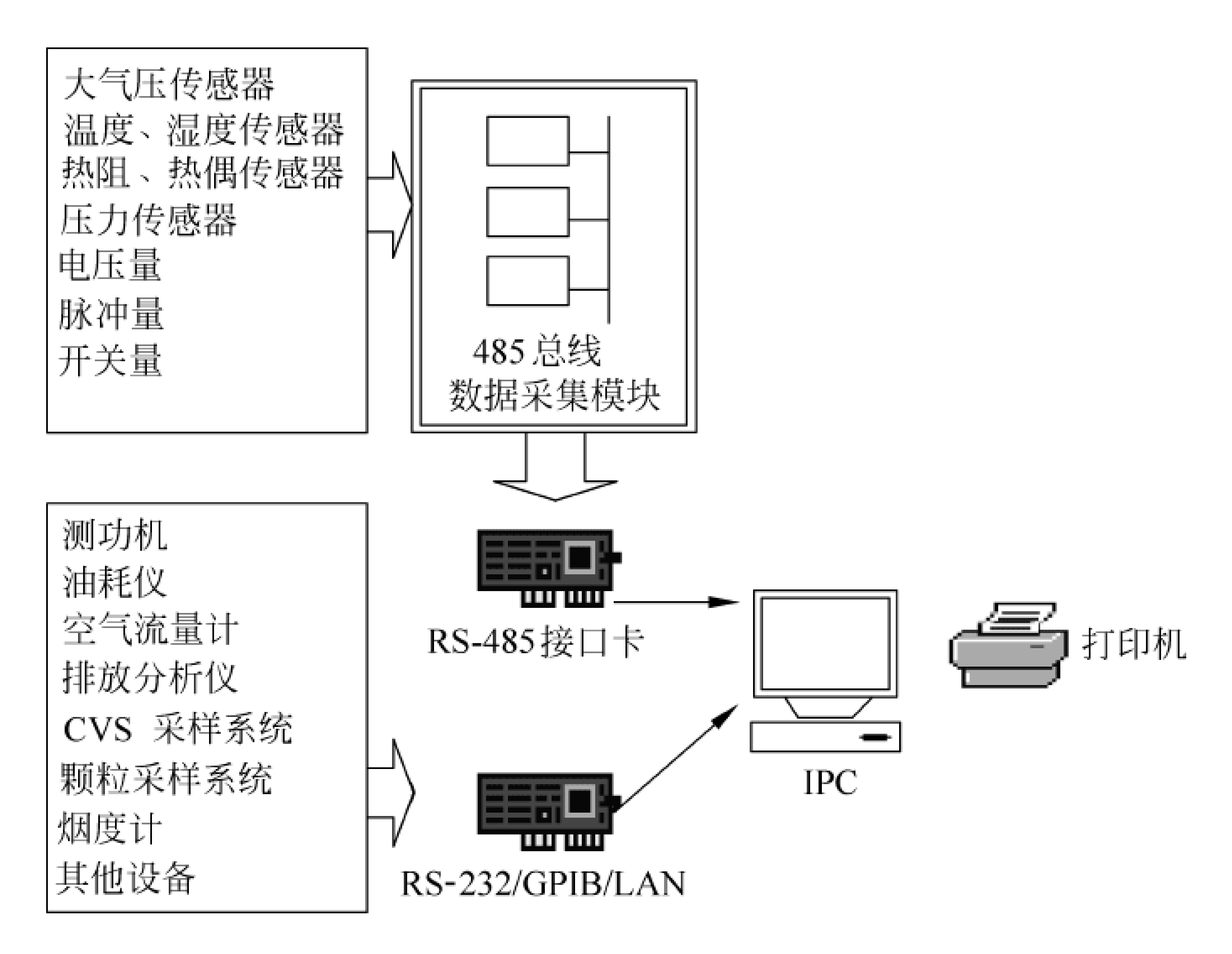


图 2-20　主控计算机系统硬件布置图

3. 数据采集处理系统的软件

主控计算机系统软件在 Windows XP 操作系统环境下，采用虚拟仪器开发平台 LabVIEW 开发。重型柴油机排放测试主控计算机系统的主要任务包括传感器及测试设备的数据采集，控制外围设备实现法规规定的试验流程以及原始数据及计算结果表格的打印输出。软件主要功能模块如图 2-21 所示。

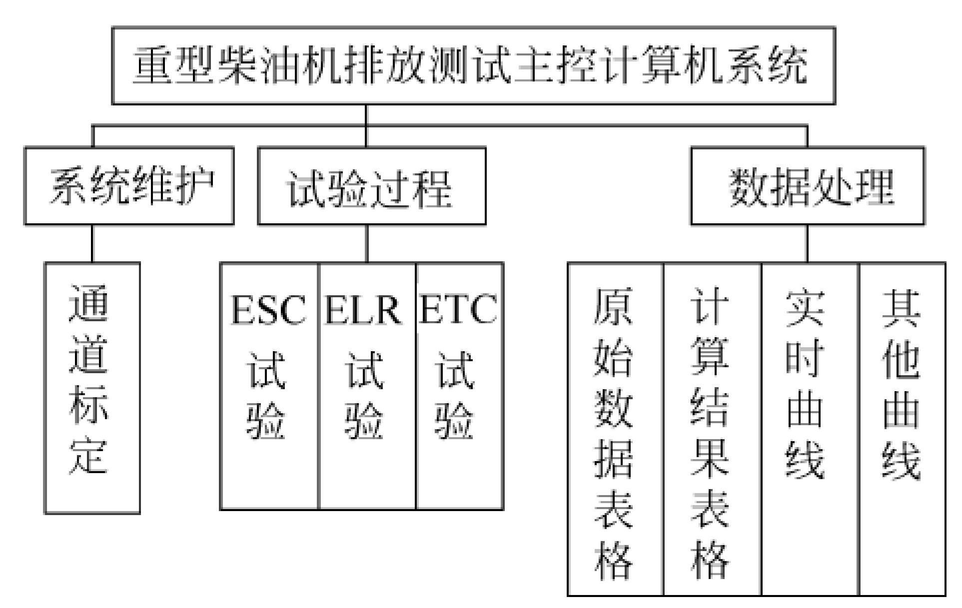


图 2-21　软件功能模块

系统维护模块能实现模拟量采集通道的标定功能，并通过曲线拟合算法计算出模拟量和工程量的转换系数。试验过程模块实现各类排放试验的数据采集和流程控制，将测量结果存入数据文件。试验类别包括欧盟、中国等国家法规试验程序（如法规中的 ECE、ELR 和 ETC 等试验程序），或根据试验目的及要求的不同编写相应的试验程序。数据处理模块实现试验数据的处理任务及计算结果表格的打印输出，试验过程中以 10 Hz 频率记录全部测量数据，可通过实时曲线功能打印输出，包括研究开发过程中需要的其他形式的数据处理结果，如 ESC 试验排放污染物工况分担率曲线等。关于内燃机排放测试详见第 5 章。

2.1.3　控制系统

内燃机台架控制系统是完成各类内燃机试验、测量和数据处理的计算机系统。可手动

或自动进行内燃机测试，而且可以在两种控制方式之间平稳切换。

控制系统的功能为：对内燃机油门和测功机负载调节装置实施控制，以便于对内燃机进行各种试验；通过控制燃料消耗仪，实现对内燃机燃料消耗量的自动测量；对内燃机冷却系统和机油温度实施恒温控制；在测试过程中对内燃机实施监控、报警、停机保护，如超速，水温、油温和油压过低、过高，负载过大，排温过高等。

控制系统的核心是一个能独立工作的计算机系统。工作时，系统首先根据试验类型（功率特性、负荷特性、调速特性、工况法试验等）确定当前的控制方式，如恒转速、恒扭矩等，然后由被测试的工况计算出理想的油门位置，理想的测功机负载调节装置位置，并结合当前传感器的反馈信号不断地测量实际工况与理想工况值之间的偏差，通过 PID 算法，计算出实际的内燃机油门位置和测功机负载调节装置位置的大小，再驱动它们向理想值方向调整。最后通过数据量 I/O 和模拟量 A/D 接口卡，采集扭矩、转速、燃油消耗量等参数，同时将数据送往显示器进行实时数据显示和过程曲线显示。

2.1.4 冷却系统

在进行内燃机试验过程中，试验台有专门的冷却系统，包括水箱、热交换器和温度控制器等零部件。

实验室冷却水系统主要用于冷却下列部分：

（1）来自试验台架的热量；

（2）测功机热量；

（3）内燃机冷却系统热量；

（4）燃料及润滑油温度控制。

此外还可用于保持稳定液面（水力测功机）及清洗等功能。

冷却系统一般有以下两种形式。

（1）内循环式冷却系统

模拟实际装车情况，内燃机的水泵将热水送入散热器，散热器前面有冷却风扇，模拟汽车行驶时的迎面风。这种封闭冷却系统适用于中小功率内燃机。

（2）外循环式冷却系统

这种冷却系统适用于中、高功率内燃机。一般来说，实验室所有内燃机台架共用一个外循环冷却水系统。其线路流程如图 2-22 所示。由于试验用水量很大，冷却水系统都应采用循环方式，以便节约用水量。因此实验室都有一个位于地下的蓄水池，水平面应低于测功机的底面高度。蓄水池的容量取决于：实验室的台架数及设计功率、测功机型式、使用台架试验的频率及冷却塔冷却能力。通过手动或自动调节方式，将城市自来水补充到蓄水池中，使蓄水池水位保持稳定。当冷却水温度过高时，通过水泵将部分水送至冷却塔进行冷却。由于内燃机台架用的测功机需要稳压（通常压力为 350～400 kPa）以保持水位不变，因而需要一个稳压阀加以调节。此外加压后的冷却水还要用于燃料、水冷内燃机和内燃机机油的冷

却，由于冷却温度不同，通常应配置热交换器。所有台架的热水经回流水管流回蓄水池。

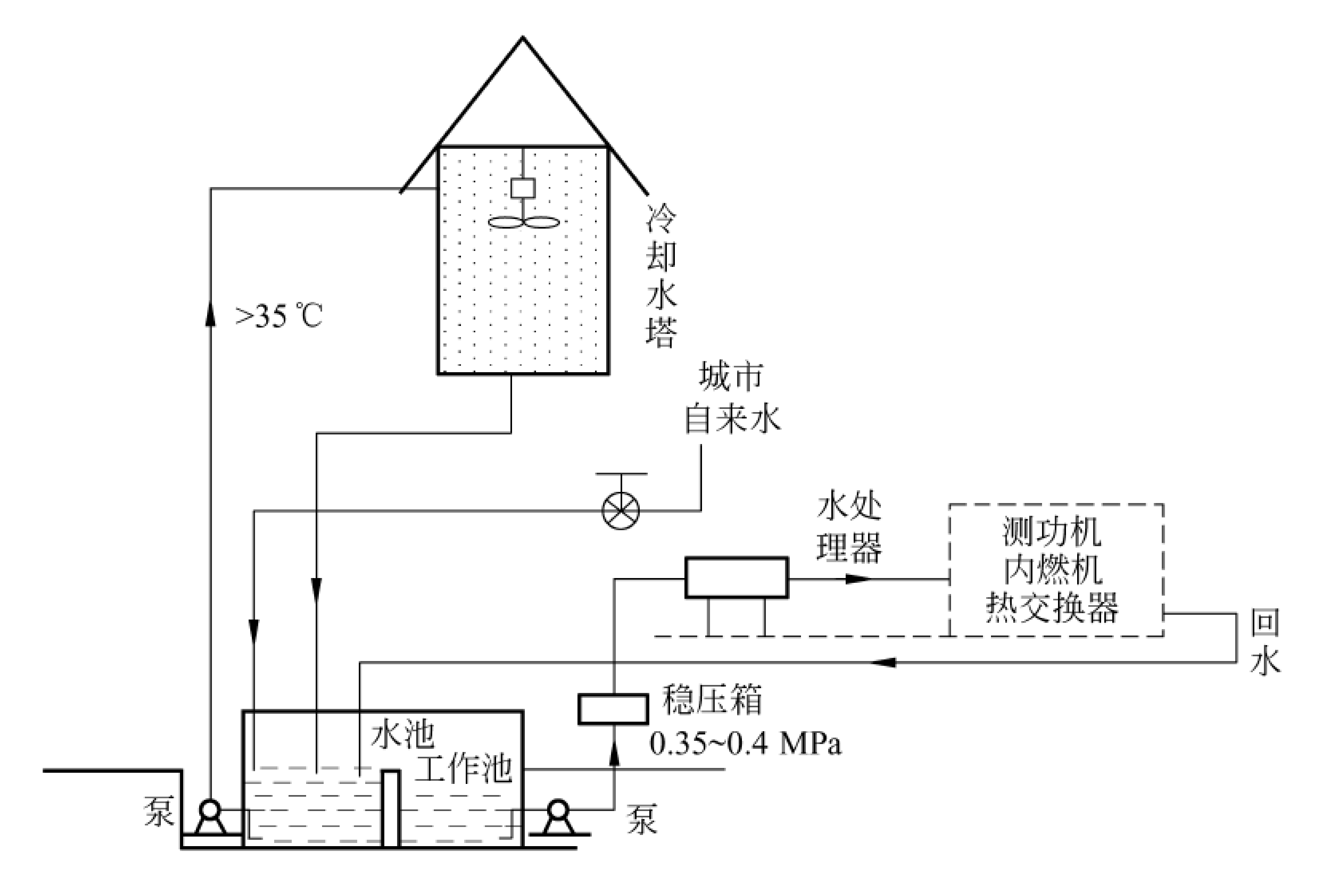


图 2-22　内燃机实验室外循环式冷却水系统示意图

整个冷却水系统的水泵和阀门都应能自动控制与调节。考虑到冷却系统为各台架共用，因而每个台架的操纵台都可对其控制，保证只要有一个台架运转（使用水泵）水泵就处于运行状态；只有当所有的台架都不使用时才关闭水泵。为节约用电，也可以应用多台水泵，用水量少时启用一台水泵，用水量多时启用多台水泵。用变频电机也可节约电能。

如果冷却水的（吸）热量很大，在气温较低地区可以考虑热量的回收，作为实验大楼的采暖（供热）。

水管的布置应尽量安排在台架下面的地下室。由于台架是弹性的，因此与台架相接的水管应尽量考虑使用柔性连接管。此外，冷却水应软化、过滤和去盐。

2.2　实验室环境系统

2.2.1　通风系统

为把汽车内燃机台架试验间内内燃机辐射出来的热量、散热器散发的热量、内燃机泄漏的废气、燃料泄漏蒸发的气体排出室外和保持（控制）实验室室内空气的温度和废气浓度在规定的范围内，实验室需要通风系统。

内燃机室内的通风（气流组织）有两种方式：

1. 上送下排式

这种方式有利于内燃机泄漏于室内的废气和烟尘直接被吸入地下室排出室外，减少废

气对室内的污染。这种方式的优点是：实验室比较清洁，不易被内燃机泄漏的废气污染墙面。为保证此种方式的正常进行，实验室内应保证微负压。

2. 下送上排式

这种方式使进入室内的空气直接冷却内燃机，可得到较好冷却效果，通风系统设计、建造较简单。缺点：实验室墙面易受废气污染。

由于内燃机台架实验室的热源——内燃机的散热量多，变化也很大，精确地确定散热量比较困难，同时由于内燃机排气中的有害气体对环境和人体的影响，因此，对内燃机实验室的通风设计提出了更高的要求。在设计中，若通风量选得过大，则使制造成本提高和运行费用增加，但若通风量不足，则影响到试验的正常运行。一般通风量为：每分钟实验室内空气更换二次。

2.2.2 进排气系统

1. 进气系统

一般情况下，内燃机的进气可直接采用实验室内的空气，也可以采用专用空气源供给系统。专用气源供给方式有两种：一种是采用直接管道法取得室外新鲜空气，此时应考虑连接管路有足够的流通截面，同时要考虑进气滤清和消声；另一种是采用进气调节系统供气，通过该系统来调节进气状况（温度、湿度和压力），并保证进气的洁净度。若将进气调整为标准状态，则不必进行大气修正，此外也提供了进行一些环境模拟试验的可能。如用恒温、恒压、恒湿进气空调，且需要保证送气量能满足试验内燃机的进气要求。

根据国家标准 GB/T 18297—2001《汽车发动机性能试验方法》规定的内燃机进气状况的要求（详见第 3 章），最佳供气条件应接近标准状况。目前国内已有产品能满足恒压、恒温、恒湿的进气要求，从而可大大地减少校正误差。

如要进行内燃机环境适应性模拟标定试验，像内燃机的“三高”标定（高温、高寒、高海拔）试验，可将内燃机实验室建成环境试验舱，该试验舱可模拟各种环境状况，如温度、湿度、压力等。

2. 排气系统

为减小内燃机排气背压，实验室内的排气管直径要大于内燃机排气管直径。废气应排到室外排气坑内进行消音、防爆及一些废气过滤处理。有些时候为了模拟整车的实际使用状况，要用节气门等节流装置改变排气背压。

2.2.3 消声与隔声系统

内燃机实验室噪声主要来源于内燃机本身，其次是通风系统、测功机及其附属部件，而噪声尤其是内燃机的噪声已成为环境污染的重要来源之一。为降低噪声，常规实验室一般只是在实验室墙壁周围装有防火吸音材料，另外为降低内燃机控制间的噪声，实验间通向控制间的门应具有隔音、防火作用，在控制台前面的观察窗是双层、加厚、高强度的玻璃窗。双层玻璃不仅起到隔音的作用，也能保证试验人员的安全，因为内燃机试验时实验间有可能会

飞出碎片击毁单薄的观察窗。

通常用于内燃机噪声试验和开发研究的实验室必须经过特别的消声处理,以降低背景噪声。

如进行内燃机 NVH(noise,vibration,harshness)研究,需建造噪声实验室。噪声实验室分为全消音实验室和半消音实验室。全消音实验室的六面墙壁全部敷设特殊的吸音材料,有平板式和尖劈式。半消音实验室的消声室五面墙壁全部敷设特殊的吸音材料,地面处理也有特殊要求。

内燃机噪声实验室的消声室有两类,一类是用于内燃机整机试验的大型消声室,另一类为消声器试验用的小消声系统。前者的建设费用很高,一般只在大型企业和专门研究机构中采用。

2.2.4　燃料供给系统

实验室的燃料供给系统是内燃机实验室的重要组成部分,该系统主要由油箱(油罐)、油泵和油管组成。根据试验目的不同,燃料有不同种类,如 0 号柴油、−10 号柴油、−20 号柴油,92 号汽油、95 号汽油及天然气。合理的配置是提高试验效率的保证,同时也提高了实验室的安全性。

2.2.5　安全系统

因为内燃机实验室比较复杂,不安全因素众多,因此,安全特别重要。不安全因素主要有:易燃易爆气体和燃料、各种电器、起吊设备、高速旋转的零部件、湿滑的地面等。因此,实验室安全系统应有:易燃易爆气体传感器,通风、监控和报警系统,消防系统,干粉灭火器,触电保护系统,高速旋转件防护系统等。

上述内燃机试验系统设计的基本原则是要从试验对象、试验目的和要求出发,达到技术上合理、经济上节约的效果。

内燃机实验室通风系统、进排气系统设计需要考虑很多因素,如热量的来源、流出、损失等,这些并非本书的重点,需要时读者可参阅相关的专题资料。

2.3　测试平台发展趋势

随着汽车工业的发展,汽车保有量的增加,能源和环境压力日益加剧,为解决能源危机和环境污染两大问题,研究开发低排放、低油耗的汽车新技术势在必行,汽车动力系统从传统的内燃机动力发展为纯电动、油电混合动力、氢燃料电池动力系统等多种形式。为适应新技术的发展,汽车能源动力试验系统由之前的单一燃油内燃机测试系统发展为多种动力源测试系统,因而其相应的测试平台也发生了很大变化。主要体现在:

测试平台由多种测试设备构成,试验数据有多种数据来源和不同采样频率,主控系统成为汽车动力测试平台的核心。测试系统有不同层级,包括信号级、电功率级、机械功率级等。

图 2-23 所示为燃料电池动力系统测试平台示意图。

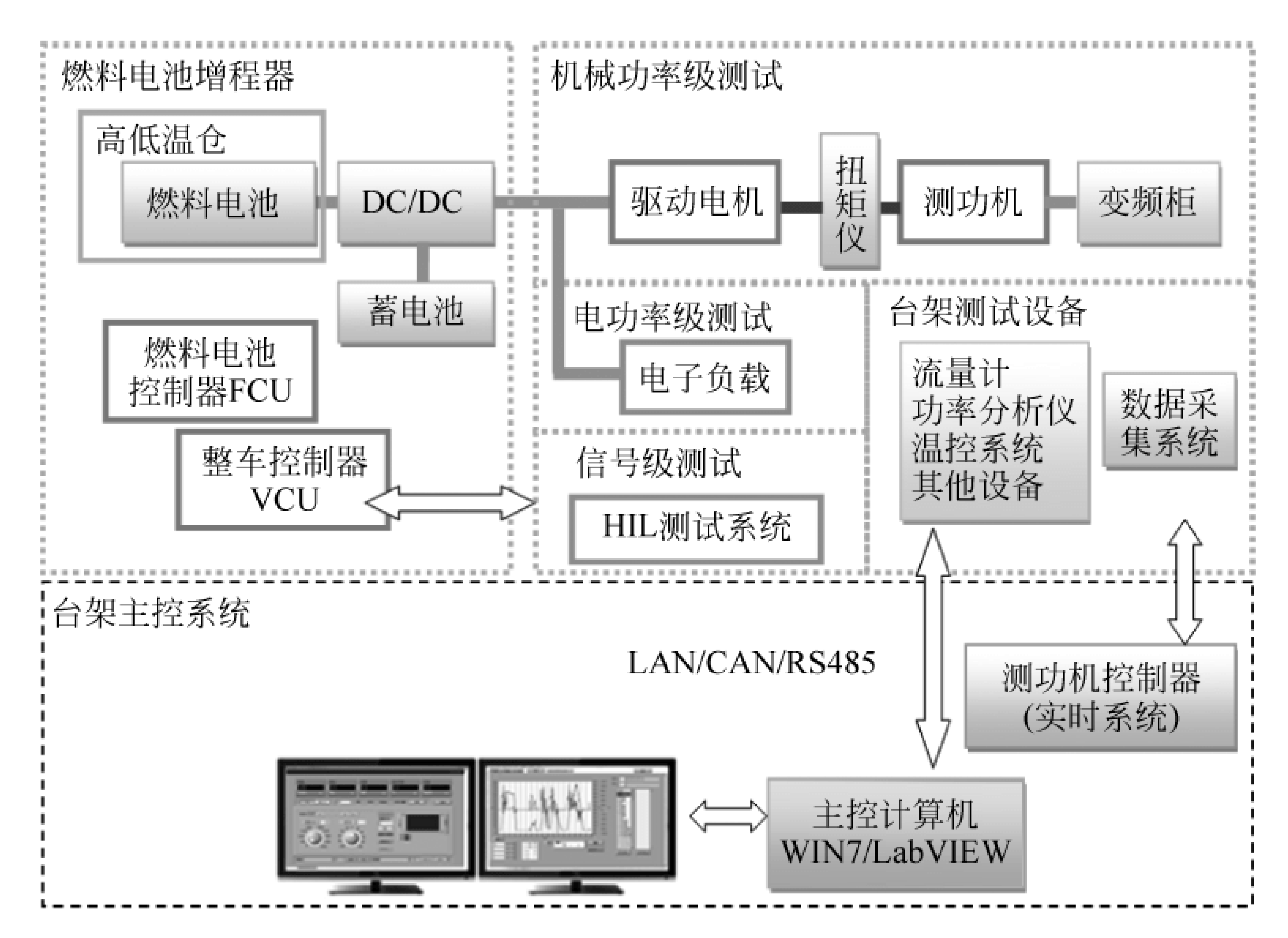


图 2-23 多层级燃料电池动力系统测试平台

为降低新产品开发成本，提高效率，基于模型的虚拟测试平台应运而生，图 2-24 是作者所在单位研发的新能源动力系统集成测试平台，包括仿真模型、快速原型系统、台架试验系统、硬件在环测试系统、实车测试系统等部分。有关混合动力台架测试系统及试验方法可参阅本教材第 11 章。

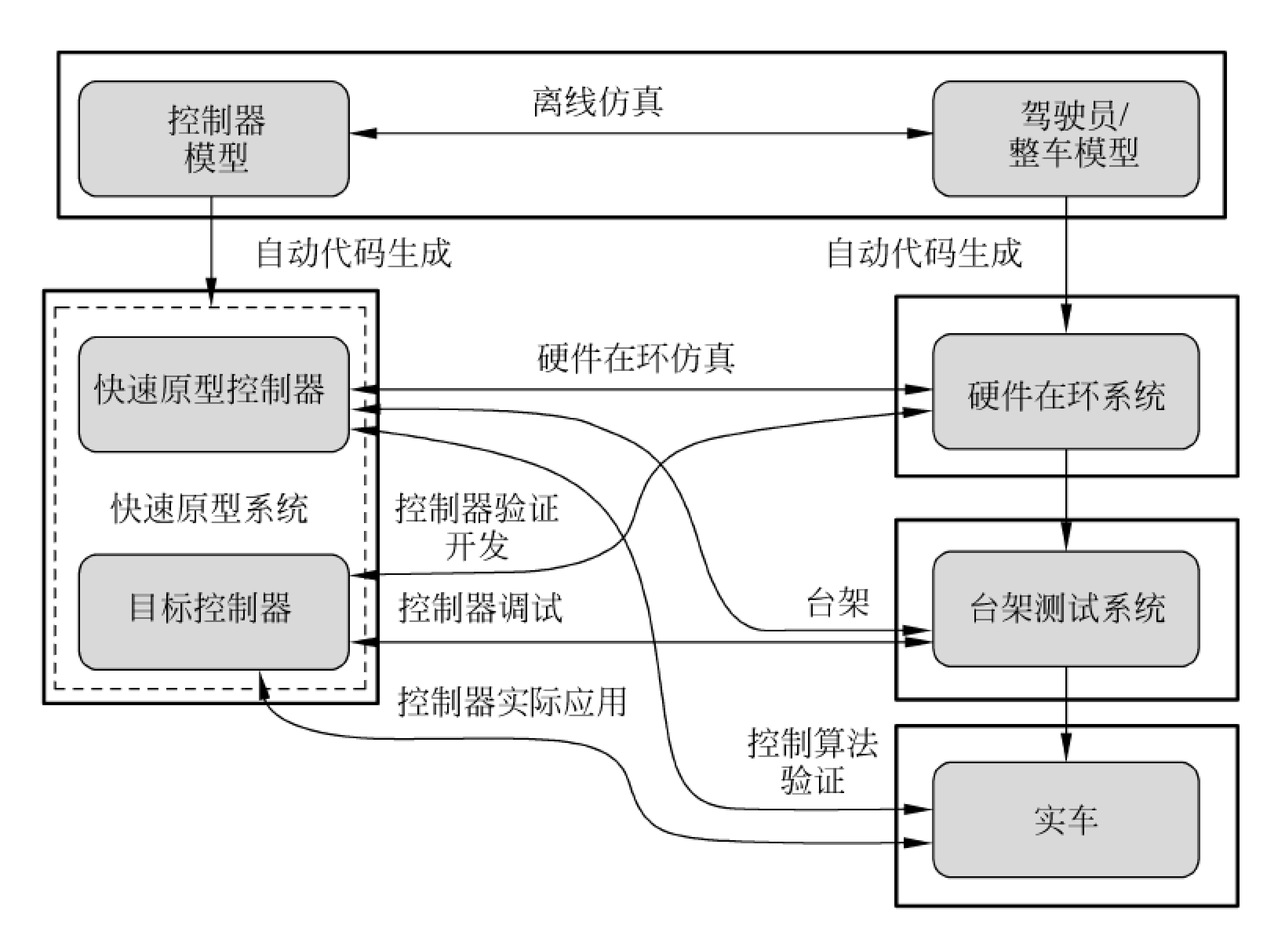


图 2-24 新能源动力系统集成测试平台示意图

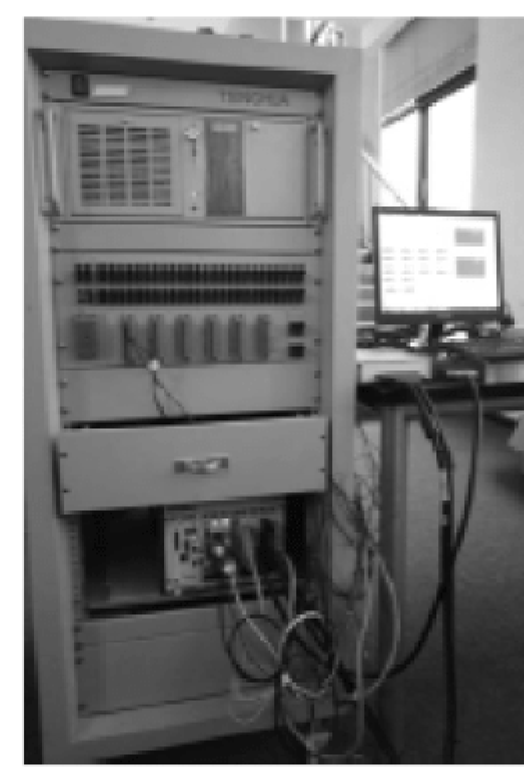



图 2-24　(续)

参考文献

[1] MARTYR A J,PLINT M A. Engine Testing Theory and Practice[M]. London:Butterworth and Heinemann,2007.

[2] 倪计民.汽车内燃机试验技术[M].上海:同济大学出版社,1998.

[3] 严兆大.热能与动力工程测试技术[M].2版.北京:机械工业出版社,2006.

[4] 唐岚.汽车测试技术[M].北京:机械工业出版社,2006.

[5] 陈顺章,杜玮珂,李海波,等.车用内燃机试验室建设工艺流程及工艺设计[J].内燃机与配件,2013(9):43-47.

[6] 崔林林.内燃机实验室设计方法的研究[J].硅谷,2012(20):90-91.

[7] 徐家群,刘明基,黄海燕,等.车用大功率燃料电池发动机动力系统平台[J].清华大学学报(自然科学版),2006(2):257-260.

[8] 包成,卢兰光,刘明基,等.燃料电池发动机测控系统控制平台开发[J].汽车工程,2004(1):13-15.

第3章 内燃机主要性能参数的测量

进行内燃机试验研究及性能检测所需的参数中，有些参数可以直接测量，有些参数则需利用直接测得的参数或已有数据经过计算求出。内燃机试验测量、计算后所需的参数项目主要分为以下几种类型。

(1) 与常规动力性、经济性能直接有关的项目：内燃机的转速、扭矩、功率、燃油消耗率、点火提前角、供油提前角、空气消耗量，进气压力和温度，排气压力与温度、中冷前后温度和压力（对于增压内燃机），排气背压，润滑油的压力和温度，冷却水温度，燃油温度、密度等。

(2) 与内燃机尾气排放有关的项目：一氧化碳（CO）、二氧化碳（CO_2）、碳氢化合物（HC）、氮氧化物（NO_x）、柴油机的微粒（PM）和烟度等。

(3) 与试验环境有关的项目：大气压力、温度和湿度等。

(4) 其他项目：根据一些特殊要求进行测试的项目，如柴油机高压喷油泵泵端和嘴端压力、充气效率、过量空气系数、汽缸内的最高爆发压力、平均有效压力、压力升高率、噪声、振动等。

对以上所述参数涉及的基本测试项目需要相应的仪器和设备，采用不同的方法进行。下面将分类进行介绍。

3.1 内燃机转速、扭矩测量和功率计算

在汽车内燃机中，内燃机在整个运转范围内的功率、工作转速和此时的输出扭矩均是重要的性能参数。内燃机某工况下的有效功率是测定有效扭矩和转速值后计算而得。计算公式如下：

$$P_e = \frac{2\pi M_e n}{60 \times 1000} = \frac{M_e n}{9550} \tag{3-1}$$

式中：P_e——有效功率，kW；

M_e——实测有效扭矩，N·m；

n——实测转速，r/min。

从式(3-1)可以看出,内燃机的有效输出功率与有效扭矩和转速的乘积成正比。

3.1.1　转速测量

转速是单位时间内曲轴的平均旋转次数,通常以每分钟的转数(r/min)作为计量单位。对于内燃机转速的测量,可用的传感器有很多种,目前主要用磁电式传感器、霍尔传感器和光电式传感器。

现以磁电式转速传感器和霍尔传感器为例简要说明其测量方法。

1. 磁电式传感器

磁电式传感器是通过磁电作用把被测参数转换为感应电动势的一种器件。它是利用带齿的含铁导磁材料在磁场中切割磁力线所产生的感应电动势来计算转速的。其结构原理简图如图 3-1 所示,由被测转轴上安装的带齿的含铁导磁材料制成的信号盘 1、永久磁铁 2、铁芯 3 和线圈 4 组成。磁电式转速传感器安装在被测对象上(内燃机使用时通常固定在机体上)。磁铁与信号盘保持有 0.5～1.2 mm 的间隙 d。当信号盘旋转时,齿的凹凸引起磁阻的变化,使磁通量发生周期变化,因而在线圈 4 中感应出交变的电动势。以 f 表示感应电动势的频率,则频率 f(Hz)与转速间的关系为

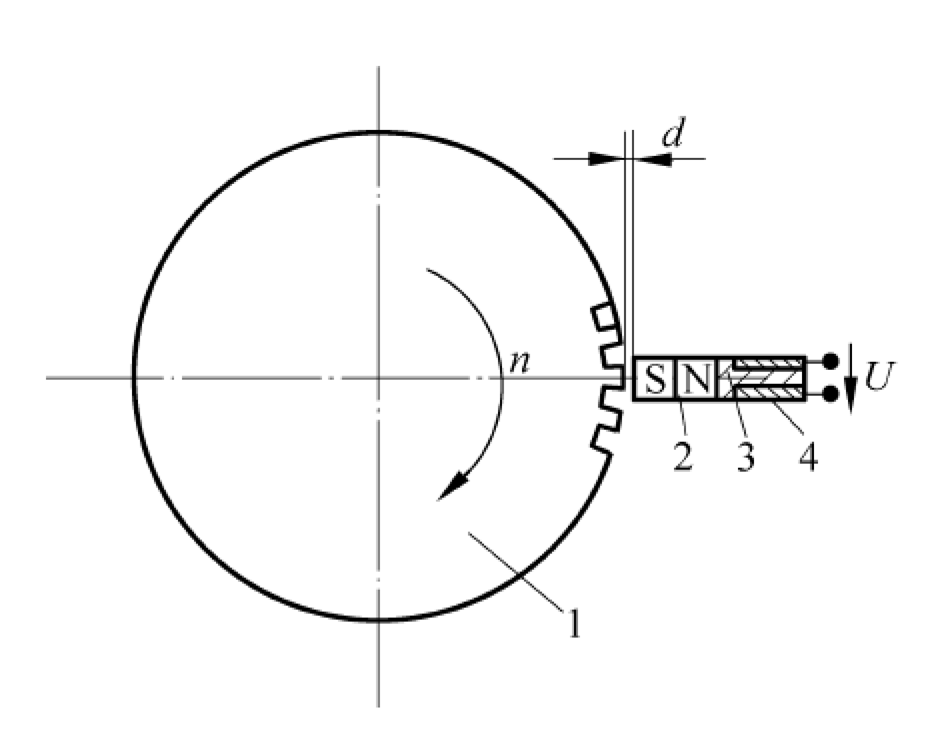


图 3-1　磁电式转速传感器

1—信号盘;2—永久磁铁;3—铁芯;4—线圈

$$n = \frac{60f}{z} \tag{3-2}$$

式中:n——内燃机的转速,r/min;

z——信号盘齿数;

f——感应电动势频率,Hz。

利用磁电式传感器也可以进行转角的度量。将转盘中的某些齿做出特殊齿形或间隔,也可以作为某一具体角(位置)的标志。

磁电式转速传感器的突出优点是不需要外加电源、结构简单、工作安全可靠、转速精度高、输出阻抗小、测速范围较广等,因此在内燃机中应用较为广泛。

2. 霍尔传感器

霍尔(Hall)传感器是基于霍尔效应的一种传感器。设在一个矩形半导体薄片上有一电流通过,此时如有一磁场也作用于该半导体材料上,则在垂直于电流方向的半导体两端会产生一个很小的电压,这种效应就称为霍尔效应。如改变磁场的强度,霍尔电压的大小亦随之改变,当磁场消失时,霍尔电压变为零。

霍尔转速传感器主要由霍尔元件或霍尔电路、永久磁铁和触发轮等组成，触发轮一般为叶片或轮齿形式，通常装在曲轴上或者凸轮轴上。图 3-2 所示为触发叶片式霍尔传感器信号发生器的示意图。当叶片进入永久磁铁与霍尔元件之间的空气隙时，由于霍尔元件的磁场被触发叶片旁路（或称隔磁），霍尔元件不产生霍尔电压；当触发叶片离开空气隙后，永久磁铁的磁通便穿过霍尔元件而产生霍尔电压。利用霍尔电压方波信号的频率，可算出转速值。

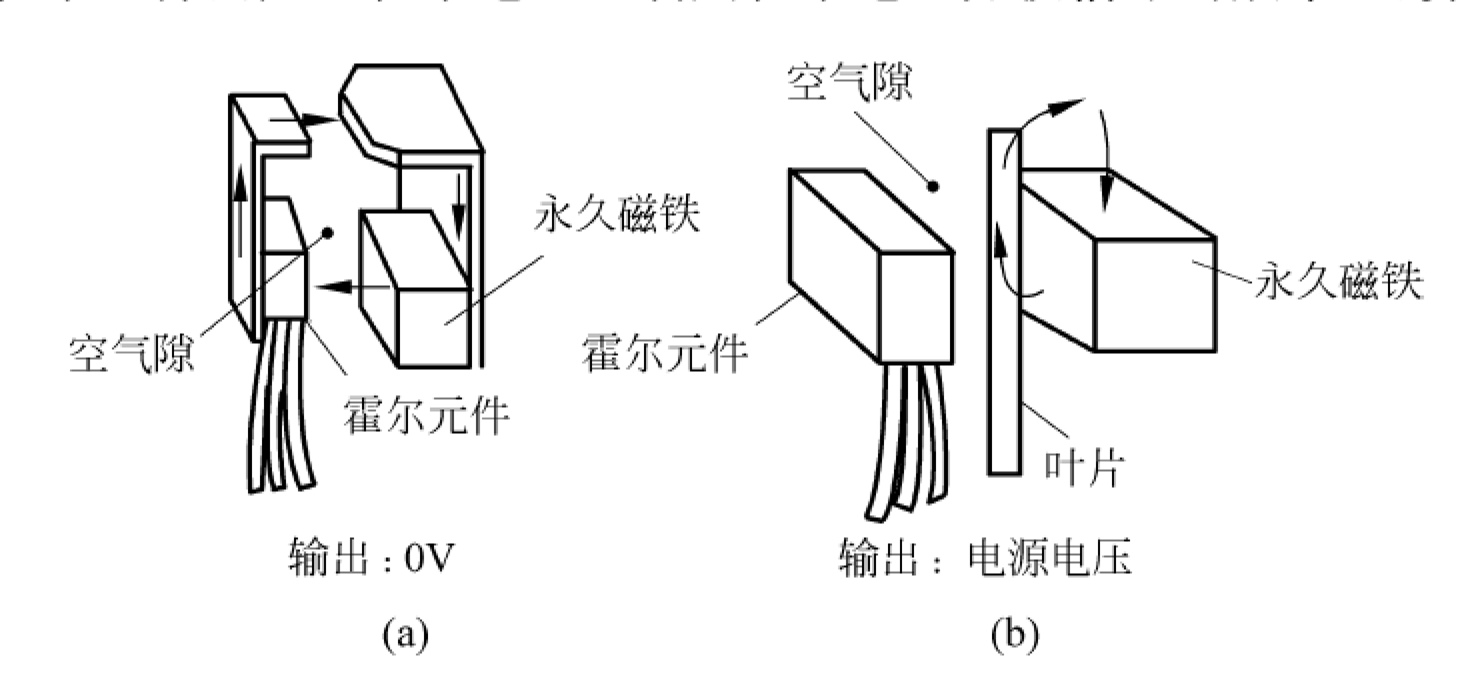


图 3-2　霍尔传感器信号发生器示意图
（a）有霍尔电压（叶片离开空气隙）；（b）无霍尔电压（叶片在空气隙中）

对于触发轮是轮齿形式的霍尔传感器，则传感器探头上通常安装有两个霍尔元件，其结构示意图如图 3-3(a)所示。

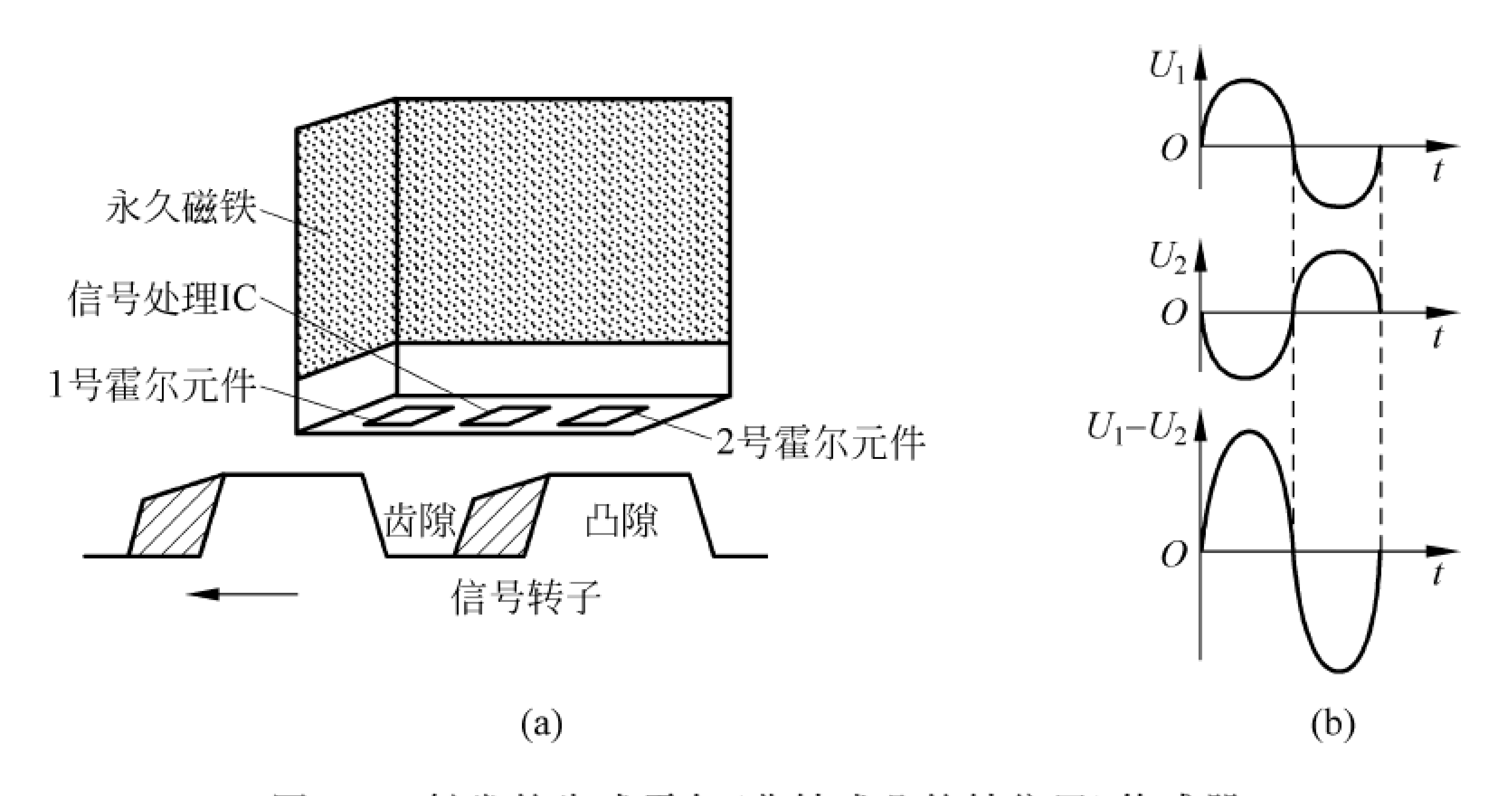


图 3-3　触发轮齿式霍尔（曲轴或凸轮轴位置）传感器

此种结构传感器的工作原理与触发叶片式霍尔转速传感器的工作原理相同。结构上有所不同，主要区别在于永久磁铁与霍尔元件安装在一侧，即霍尔芯片位于磁铁和齿轮之间。当轮齿式信号轮旋转时，使探头与信号轮之间的空气间隙发生变化，从而导致磁路中的磁场强度发生变化。根据霍尔效应，在传感器的霍尔元件中就会产生交变电压，其输出电压是两个霍尔电压（两个霍尔元件）的叠加，如图 3-3(b)所示。因输出电压增加，所以信号轮齿与信号发生器之间的间隙（(1.0±0.5)mm，或更大，关于间隙大小的进一步信息可参考

相关传感器说明书）比普通霍尔传感器间隙（0.2～0.4 mm）大。这一结构的优点是不需要在触发轮的另一侧安装永久磁铁，这样信号盘便于安装。

霍尔传感器是 1879 年由 Edwin Hall 利用霍尔效应发明的。20 世纪 80 年代以来，汽车上应用的霍尔式传感器与日俱增，主要原因在于霍尔传感器有两个突出优点：一为输出的电压信号近似于方波信号；另一为输出电压与被测物体的转速无关，且具有低速特性好、信号处理简单等特点。但此种传感器需要外加电源。

关于霍尔转速传感器的进一步信息可参考文献[1-4]及相关文献。

3.1.2　扭矩测量

1. 扭矩测量原理及装置

第 2 章已介绍过，在内燃机台架上，要想精确地测出内燃机扭矩的大小，通常的办法是给内燃机施加阻力矩（负荷），即通过测功机给内燃机一个“负荷”，利用测功机浮动外壳的测点受力来测量内燃机的扭矩。为此，测功机本身应具有吸收能量或传送动力的功能，并具有测量扭矩的装置。

根据扭矩测量原理的不同，测量扭矩的装置分为传递法和平衡力法两种类型。传递法主要应用轴式或法兰式扭矩传感器在动力的传递过程中测出扭矩值。平衡力法则如前面所述，利用作用在测功机上的作用扭矩与反作用扭矩大小相等、方向相反的原理来测量扭矩。目前测试内燃机稳态运转时的扭矩普遍应用的是利用平衡力法测扭矩的测功机，也叫摇摆式测功机。但传递式扭矩测量装置的应用也日益增多，因为此种装置精度较高，瞬态性能好，常用在动态测试试验台上。

1）平衡力法

平衡力法的测量原理及结构简图如图 3-4 所示，将测功机的外壳通过轴承支撑在支架上，外壳能自由地回转，在外壳上装有力臂，连接载荷单元。工作时在内燃机扭矩作用下，载荷单元承受的作用力 W 乘以力臂长度 L 就是扭矩值。扭矩的表达式如下：

$$M_e = WL \tag{3-3}$$

式中：M_e——实测有效扭矩，N・m；

W——作用在载荷单元上的力，N；

L——力臂长度，m。

2）传递法

转轴受到扭矩作用时会产生变形，传递法就是根据扭矩传动轴的扭曲进行测量的方法（通过测量轴变形，利用应力与应变的关系来测量扭矩）。根据扭矩信号的传输方式，扭矩传感器可分为接触式扭矩传感器和非接触式扭矩传感器。非接触式扭矩传感器是在接触式测量的基础上发展起来的。它综合利用了已有的扭矩测量技术和方法，通过技术改进和升级实现非接触式的扭矩测量目标。由于非接触式扭矩传感器在其内部的输入和输出之间没有机械连接，不会受到磨损，故精度高，因此常用于内燃机测试试验中，尤其是动态试验。非接

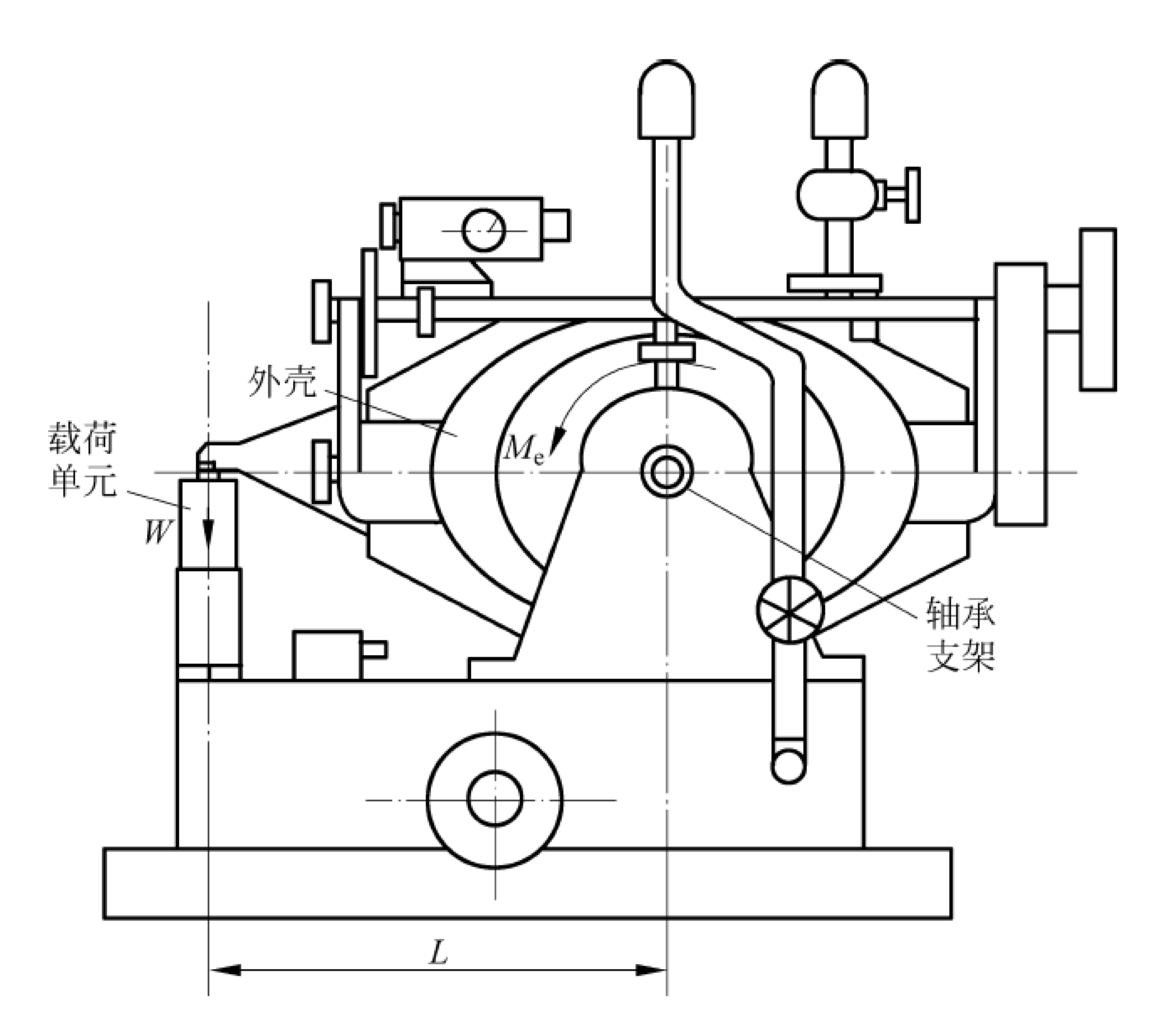


图 3-4 测扭矩机构(测功机后视图)

触式扭矩传感器按检测方法可分为应变式、磁弹性式、磁电式和光电式传感器。关于扭矩传感器的进一步信息可参考相关书籍、文献[5-6]及相关传感器说明书。

下面简要介绍磁电式和应变式传感器。

(1) 磁电式传感器

利用磁、电感应的非接触式扭矩传感器结构原理如图 3-5 所示,在一根弹性轴的两端安装有两个信号齿轮,在两齿轮的上方各装有一组信号线圈,在线圈内均装有磁铁,与信号齿轮组成磁电信号发生器。在弹性轴受扭时,将产生扭转变形,使两组交流电信号之间的相位发生变化。在弹性变化范围内,相位差变化的绝对值与扭矩的大小成正比。安装示意图如图 3-6 所示。

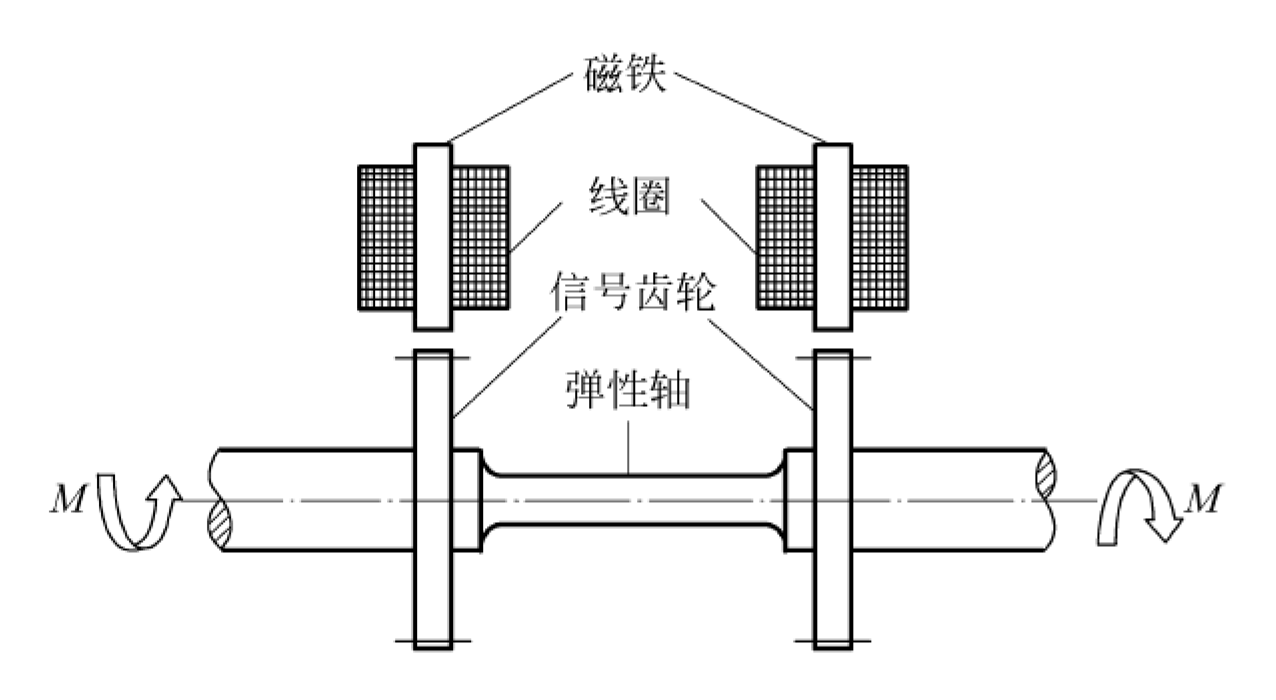


图 3-5 磁电式测扭传感器工作原理图

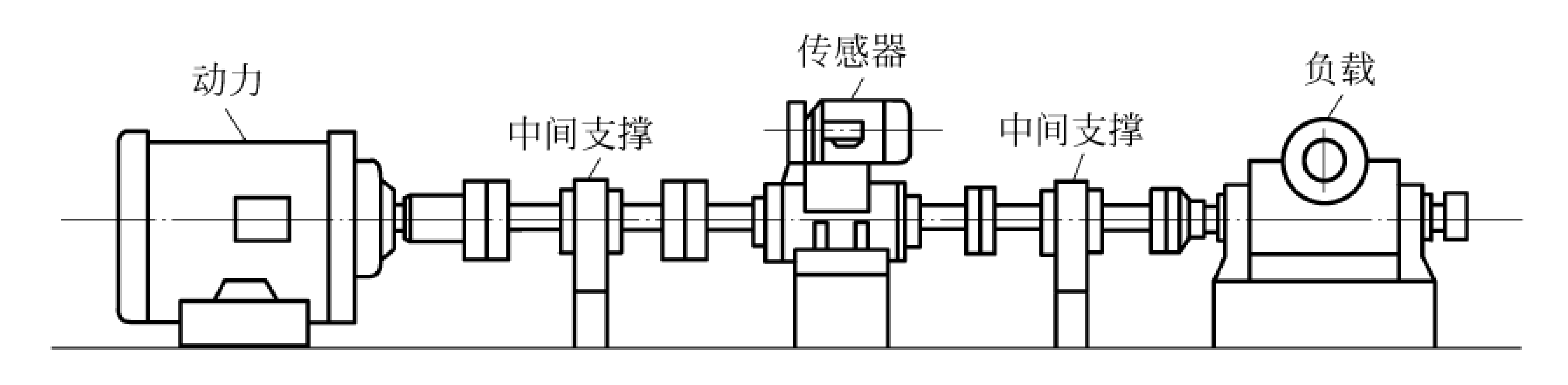


图 3-6　扭矩传感器一般安装示意图

(2) 应变式传感器

应变式非接触扭矩传感器的结构原理如图 3-7 所示，该图显示的是法兰式传感器(相应的也有轴式)结构原理示意图，主要由定子和转子组成。

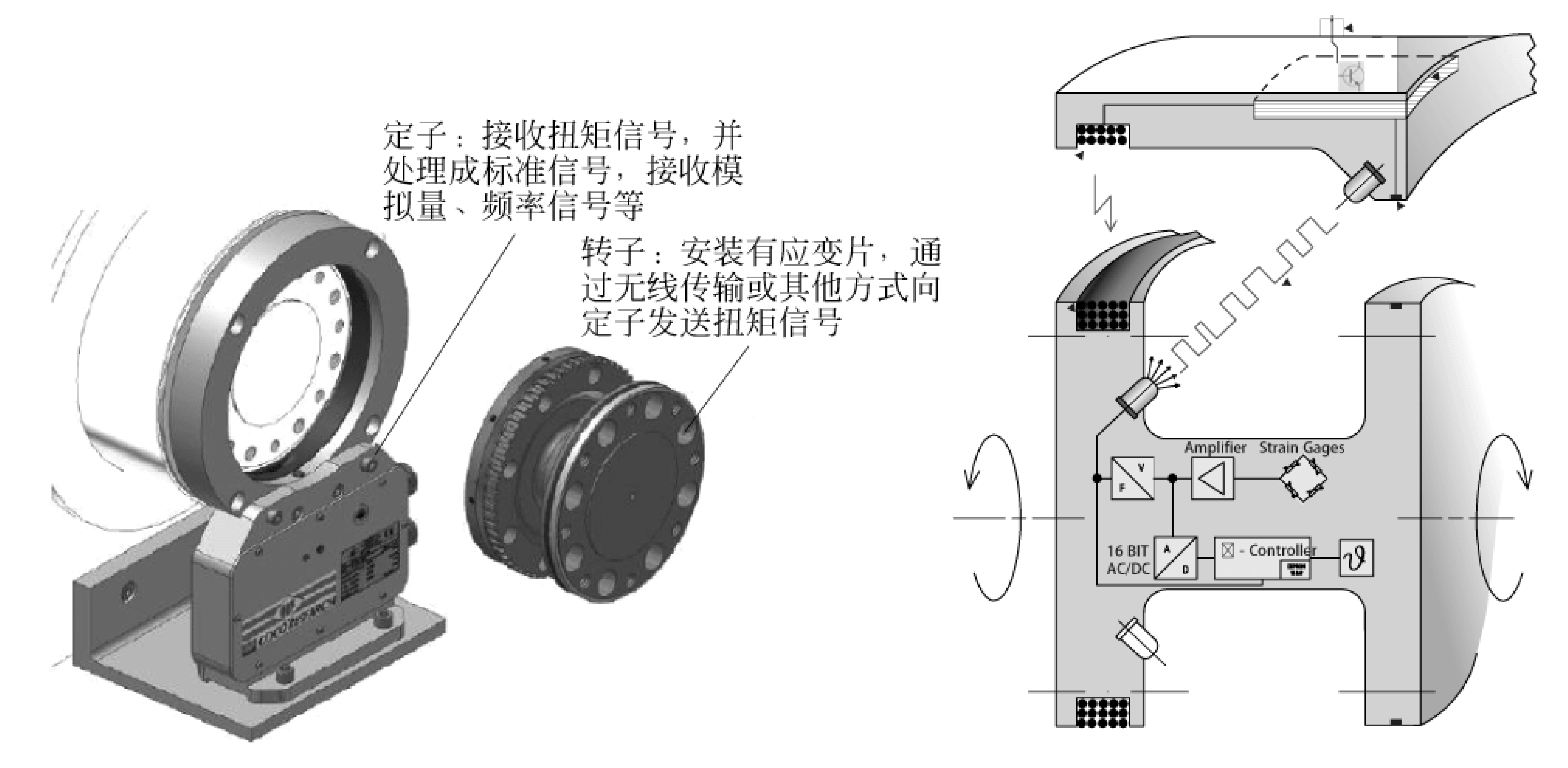


图 3-7　应变式非接触扭矩传感器结构原理示意图

在转子即被测弹性轴上用应变胶粘贴专用的测扭应变片，并组成惠斯通桥，通过装在定子上的信号传输单元向该惠斯通桥提供有源激励(恒定电源)，此时，当弹性轴发生扭转变形时，惠斯通桥应变片阻值随之发生变化，即可获得该弹性轴受扭后成比例变化的电压信号，如图 3-8 所示。通过内置放大电路将该电压信号放大后，经过相应的信号处理和转换变成与扭应变成比例的模拟信号——电压量或频率量，用无线信号传输方式(或其他方式)将信号传给装在定子上的扭矩信号测量仪器。安装示意图如图 3-9 所示。

法兰式非接触式扭矩传感器的测量原理与轴式非接触式传感器相似，不同的是：法兰式扭矩传感器没有轴承支撑。由于没有轴承，因而没有易磨损件，使之可长期使用，且工作速度可大为提高。

2. 扭矩测量误差

在内燃机台架试验中，如扭矩采用平衡力法测量，其测量误差除了非电量电测装置带来

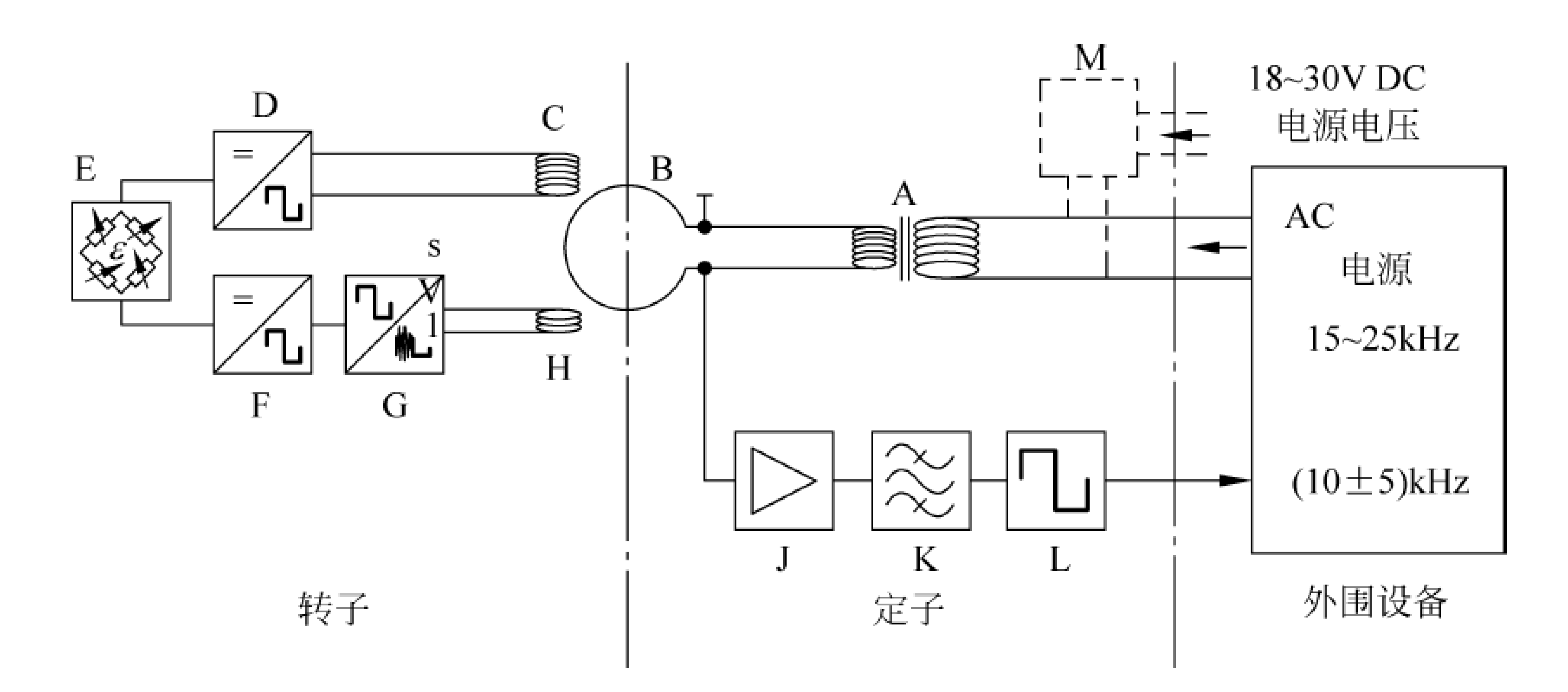


图 3-8 应变式扭矩传感器信号传输示意图

的误差外，主要是测功机的误差。各种测功机的一个共同的主要误差来源，就是浮动定子两端轴承摩擦带来的误差。由于定子只在很小角度内摆动，长期和过载使用会造成局部出现压痕而带来较大摩擦阻力。因此，除关心轴承的润滑状况外，还应定期进行检查和标定。

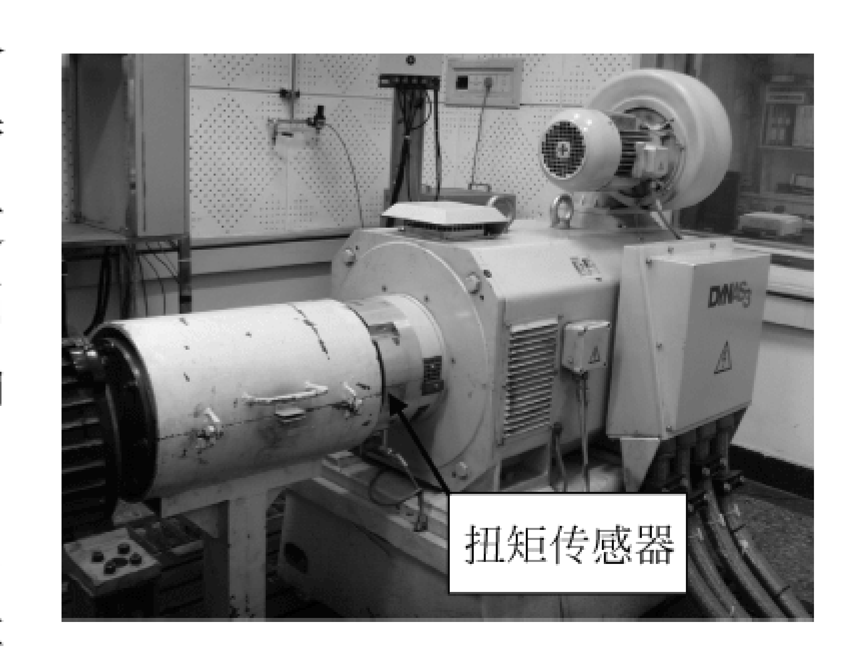


图 3-9 法兰式扭矩传感器安装示意图

电力测功机多用鼓风机进行冷却，形成鼓风损失，且随转速增加而大幅上升。这是一种系统误差，可事先预估进行修正。

电力和电涡流测功机电线的刚性和水管、润滑油路的刚性会产生摆动阻力，带来误差，因此宜采用柔性管线，并尽可能从中心引入。水力测功机水位的波动，也是误差的来源之一。

由于测功机误差随使用时间和装配情况而变化，所以长期使用和维修安装后应重新进行校正标定。标定的方法参见 2.1.1 节“测功机的校正”，应该注意的是机械摩擦阻力有方向性，单纯的加载测量会形成无法估计的系统误差。所以标定过程中应记录顺序加载和顺序减载时的两组数据，取其平均值作为标定结果(或参照相关标准)。

3.2 活塞压缩上止点与点火提前角和喷油提前角的测定

1. 曲轴位置及汽缸识别传感器

内燃机的大多数性能都与点火提前角(点燃式内燃机)和喷油提前角(压燃式内燃机)有紧密的关系。电控汽油机或点燃式内燃机要标定提前角的 MAP 图；研发试验中要进行大量随提前角而变化的性能参数试验，如最大功率空燃比和最经济空燃比的确定等。因此必须准确确定提前角数值。提前角准确测量的前提则是正确决定点火定时和喷油定时的基准

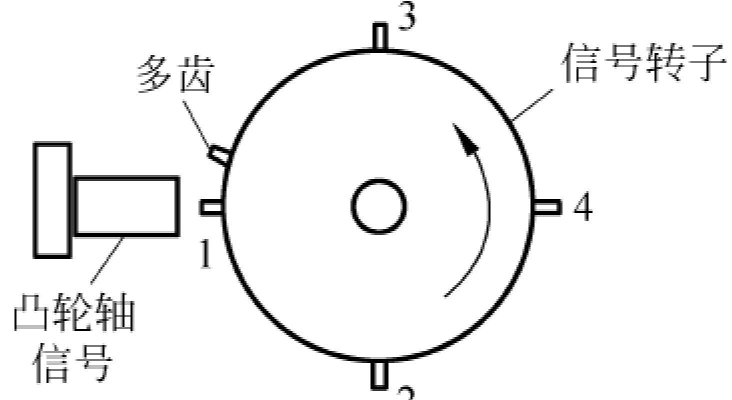
点，即必须准确测定曲轴在压缩上止点时的位置。因为压缩上止点确定后，它与点火时刻（点燃机）或喷油时刻（压燃机）角度的差值就是所需测定的提前角。为此，电控内燃机具有专用的曲轴位置传感器（crankshaft position sensor，CPS）。实际上内燃机曲轴位置传感器除了可提供相对于活塞上止点位置的曲轴转角信号外，还可测量内燃机转速，以及各种信号的相位和转角数值，因此，曲轴位置传感器又称为内燃机转速与曲轴转角传感器。其功用是采集曲轴转动角度和内燃机转速信号，并输入到电子控制单元（electronic control unit，ECU），以便确定点火时刻和喷油时刻。对于四冲程内燃机，由于每循环曲轴旋转两周，各缸都存在两个上止点（压缩行程和进气行程），因此还需要识别是哪一缸，哪一个上止点，即需要一个用于识别汽缸的传感器信号轮。信号轮通常安装在凸轮轴末端，传感器安装在缸盖、缸盖罩或齿轮盖上，又称凸轮轴位置传感器。因为凸轮轴转一圈正好是内燃机的一个工作循环，只要它的位置信号与某缸压缩上止点相对应，则该信号出现的时刻，必然对应于该缸的压缩上止点。因此，凸轮轴位置传感器的功用是采集配气凸轮轴的位置信号，并输入到内燃机电控单元，以便 ECU 识别顺序排列的第一缸，再确定该缸的压缩上止点，从而进行顺序喷油控制、点火时刻控制和爆燃控制。此外，凸轮轴位置信号还用于内燃机起动时识别出第一次点火时刻。

图 3-10 所示为某 4 缸内燃机曲轴位置传感器和凸轮轴传感器（判缸传感器）安装位置示意图。

实际安装中，曲轴位置传感器一般安装在内燃机缸体或变速箱壳体上（与信号盘对应），凸轮位置传感器一般安装在凸轮轴罩盖或气门室盖上。各传感器分别正对安装在曲轴上的齿盘信号轮和凸轮轴上的信号轮。

4 冲程内燃机凸轮轴信号轮转一圈（360°凸轮轴转角和 720°曲轴转角）为一个周期。一个周期内，有 4 个均匀分布的正常齿，每缸对应一个，并有一个多齿，在第一缸正常齿与第三缸正常齿之间的 1/5 处，作为判缸标志。

曲轴信号转子为齿盘式，在其圆周上均匀间隔地制作有 58 个凸齿（或其他凸齿数，如 36），57 个小齿缺和 1 个大齿缺。图 3-10 所示的位置正好对应内燃机第 1 缸压缩上止点。每个凸齿和每个小齿缺各占的曲轴转角均为 3°，大齿缺所占的曲轴转角为 15°。于是，在测试信号中的 15°宽脉冲信号处，必定是 1 缸或 4 缸（按 1—3—4—2 着火顺序）的上止点处。若同时又出现凸轮轴信号转子多齿数的非正常齿间信号时，就可以判别为被测第一缸的压缩上止点了，如图 3-11 所示。



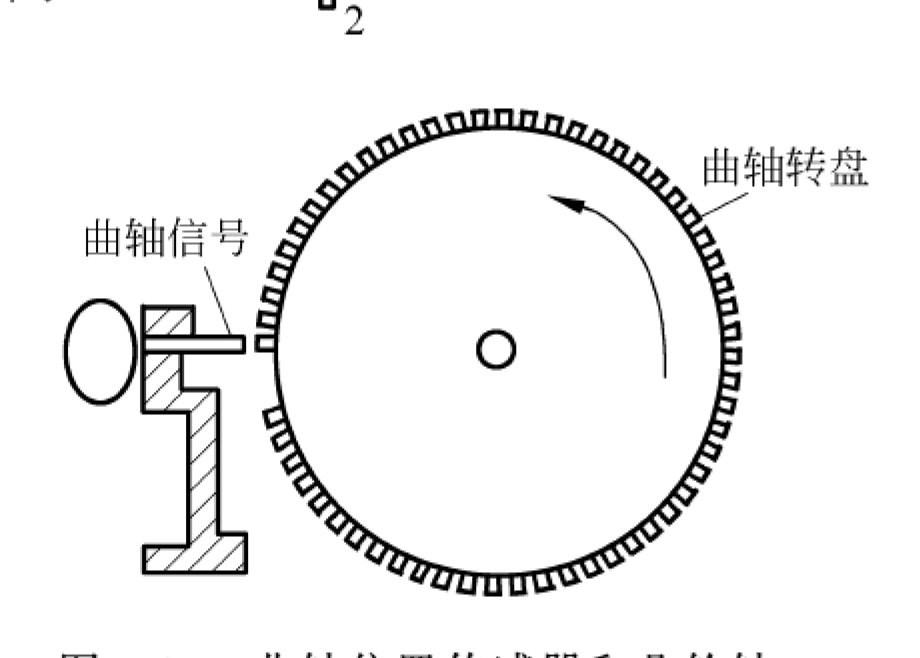


图 3-10　曲轴位置传感器和凸轮轴位置传感器安装示意图
（图为第 1 缸压缩上止点时的位置）

因为通常传感器安装时已确定第1缸压缩上止点处大齿缺同凸轮轴非正常齿相对应。将两个轴的齿形展开图进行对比，即可判断何时为1缸的压缩上止点。

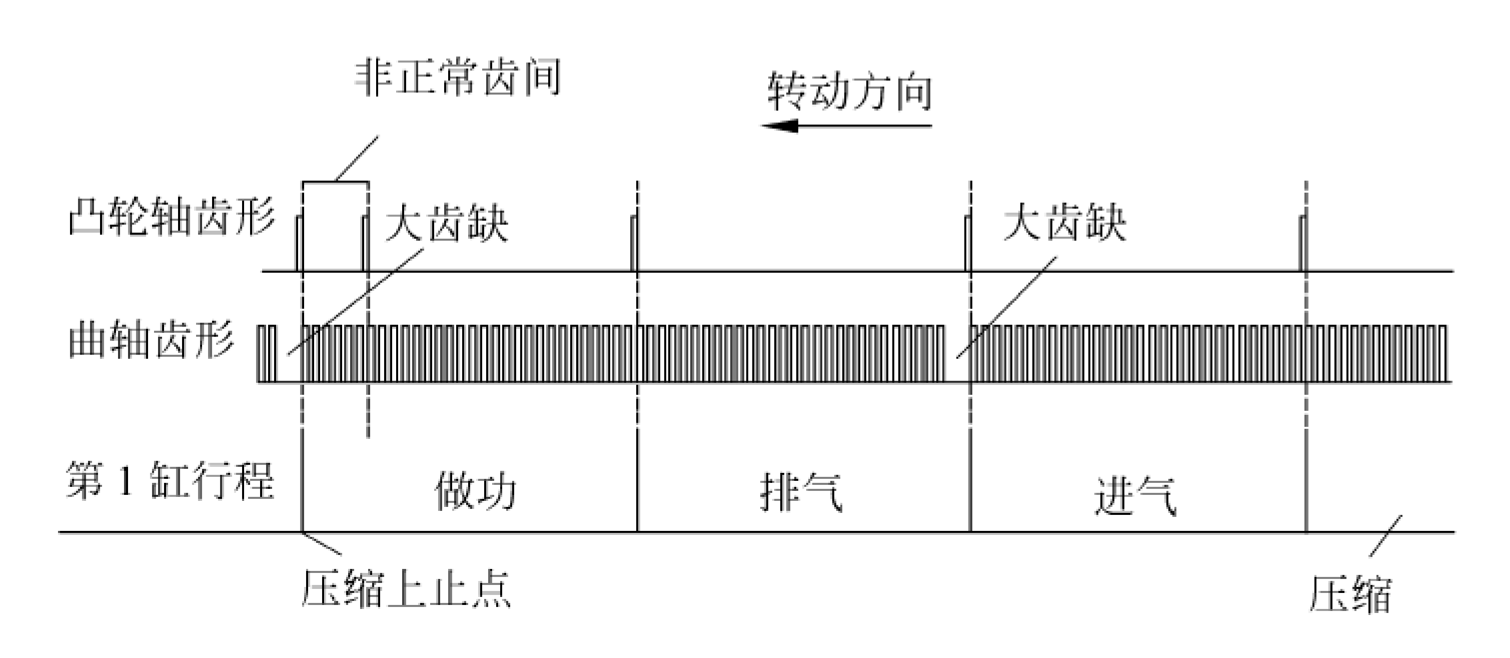


图 3-11 汽缸识别信号

对于不同用途的内燃机，其内燃机凸轮轴信号轮几何形状及齿数会有所不同，如有"1个齿""3个齿""Z+1齿"等凸轮轴信号轮。另外，曲轴和凸轮轴传感器及其信号轮的安装条件非常重要，否则会出现信号失真或丢失，进一步信息读者可参考相关传感器说明书。

为解决信号失真等问题，目前也有采用其他方法替代凸轮轴和曲轴位置传感器实现内燃机判缸功能，如采用离子流火花塞或通过内燃机缸内压力的变化来进行判缸，进一步信息读者可参阅文献[7]等相关内燃机资料。

2. 上止点真实位置确定

利用图3-10所示的曲轴齿盘宽脉冲信号或其他方法显示上止点相位时，其准确度首先取决于曲轴上止点真实位置的判定。一般来说常用的判定方法有以下几种。

1）汽缸压缩线法(倒拖法或灭缸法)

利用汽缸压力传感器记录不着火(倒拖或灭缸)内燃机的压缩及膨胀压力线，如图3-12所示。在曲线的上部(注意是在上部，不是在中部或下部)作若干条平行于横坐标的直线，各直线中点连线的延长线与横坐标的交点即为上止点相位。

一般来说，此时上止点附近的压缩与膨胀曲线是对称的，此法有一定的准确性。但当内燃机冷却散热强烈时，压缩与膨胀线对应点的温度不等，压力有差别，就会出现一定的误差，即按上述方法获得的上止点线可能与大气压力线不垂直，有一倾斜角，见图3-12中的Δa(此角也称热力损失角)。文献[8]介绍了热力损失角的测量方法，读者可参考。

2）活塞位置测量法

利用汽缸头上的孔(喷油器孔或火花塞孔，不方便时，可卸下缸盖)安装深度百分尺测量活塞顶的位置。先顺时针转动活塞，测定行程中段到顶点几个位置的尺寸，并记录对应的曲轴相位或飞轮位置。然后逆时针转动上行，记录与上行时同样位置尺寸对应的曲轴相位或飞轮位置。各位置两次测量值中点的平均值就是上止点的位置。此法简易，还可消除活塞连杆接头间隙所造成的误差。因内燃机工作中的真正压缩上止点是活塞上行消除间隙后的

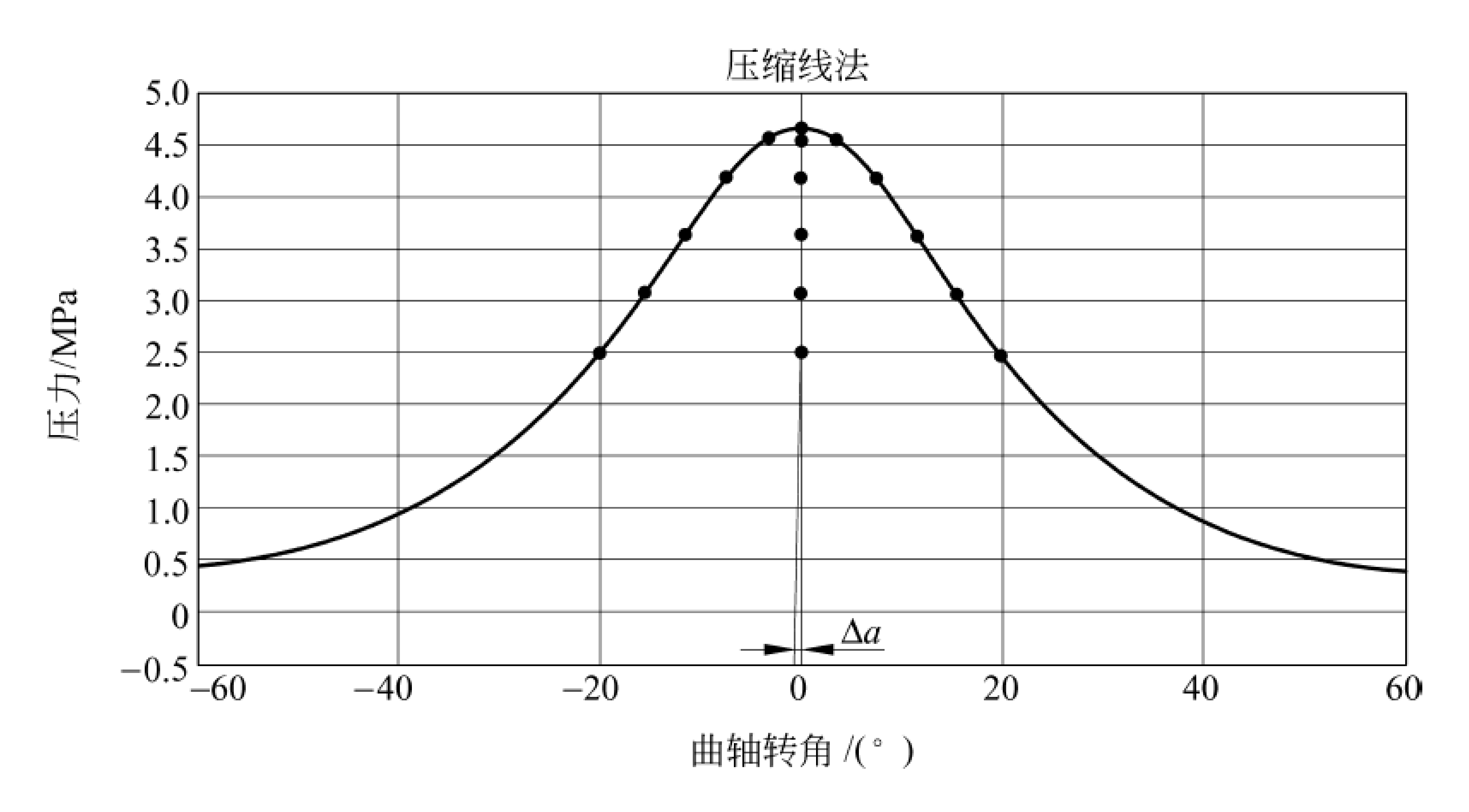


图 3-12　汽缸压缩线法确定上止点位置

最高位置，显然这一方法也有其不足之处。

3. 测定上止点位置的传感器及其误差与校正

近代大多使用磁电传感器测定已标出的上止点位置。图 3-10 所示齿盘就是利用宽脉冲信号上升沿或下降沿确定上止点的一例。图 3-13 也是常用的一种形式。绕有线圈的永久磁铁固定在机体上，飞轮或皮带轮上对应上止点位置处安装导磁材料制成的凸尖（如图 3-13 所示），它们之间的间隙 Δ_l 一般调整到 0.15～0.2 mm。飞轮旋转时在图示位置产生感应电动势脉冲（见图 3-13 中曲线），即可确定上止点位置。

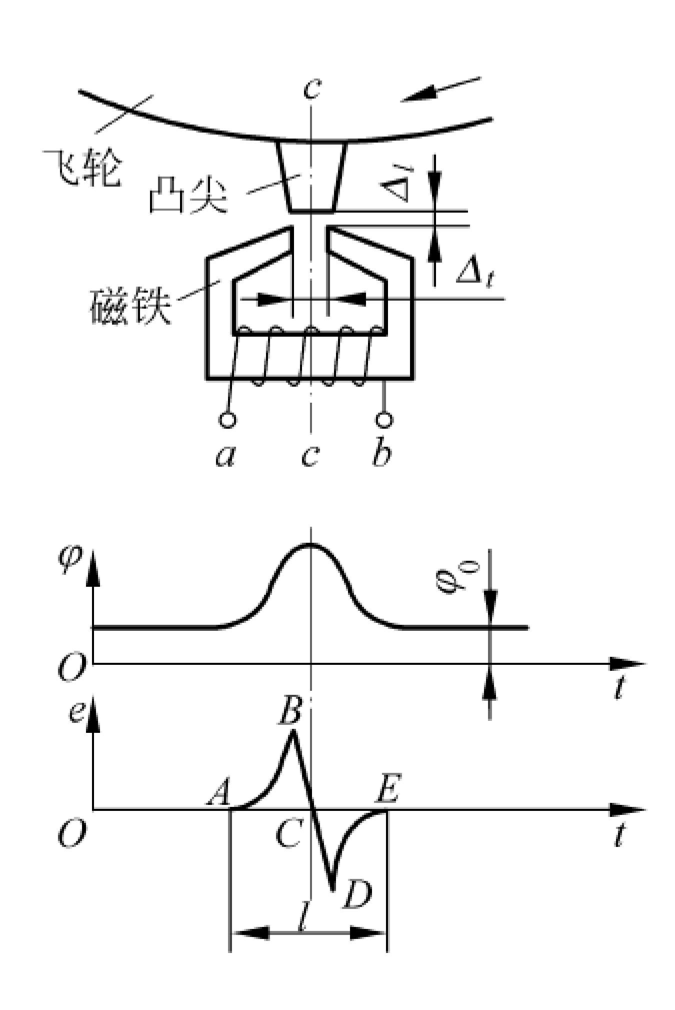


图 3-13　磁电法制取上止点位置

由于传感器安装时不可避免地存在位置误差，可以利用前述上止点位置确定的方法进行校正，当作系统误差处理。要注意测试时的传感器频响问题。此外，曲轴扭转变形也会造成上止点位置的误差，特别是对距离飞轮端较远的汽缸。目前市场上已有专用上止点测定仪（如 AVL 公司生产的上止点测定仪），该测量仪能比较容易地确定上止点的位置，并可作为内燃机动态上止点信号，但它的精度同样受安装位置的影响。

文献[9,10]分别介绍了确定上止点的其他方法，读者可参考。

4. 点火提前角与喷油提前角的判定

提前角的测定精度首先取决于上止点信号的位置精度，其次取决于记录的点火或喷油始点信号是否准确。此外还取决于曲轴齿盘的分度精度。电控内燃机的这些信号和真实的着火与喷油时刻有一定的延迟，而且随不同工况而变。有关点火提前角与喷油提前角的测

量方法和误差,可参阅相关专业资料。

3.3 压力测量与示功图制取

3.3.1 概述

在内燃机试验中,经常要进行压力的测量。如各种介质(气体、燃料、润滑油和冷却水)的压力和大气压。具体来说,各种内燃机试验过程中所需测量的压力主要指:进气管真空度及绝对压力,喷油压力,中冷前后压力,涡轮增压器的压气机进、出口压力,排气背压与排气管压力,机油压力,汽缸压缩压力,工作过程中的缸内压力和曲轴箱压力等。

为了进行专项性试验研究,有时还需测定某些零件所承受的压力(如汽缸盖、排气门、缸套、活塞),因为该参数能直接反映或影响内燃机的性能。内燃机工作过程的示功图是其动力、经济性和燃烧性能以及机械和热负荷的综合反映,它本身就是缸内压力随时间的变化曲线。因此压力是内燃机试验中非常重要的测量项目(参数)。

由于内燃机工作过程的特点,在大多数情况下,压力是经常变化的(如缸内压力),而且变化的性质和规律各不相同,数值的大小相差悬殊,精度要求高低不等。因此,需根据不同的试验目的及各测量项目的具体要求来选择测量仪器和测量方法。

内燃机试验中测量压力的仪器主要有液柱式压力计和压力传感器等。

1. 液柱式压力计

液柱式压力计是基于液体静压力作用原理,由已知液体高度测得压强。液柱式压力计结构简单,价格低廉,精度较高,一般用于检定或直接测量较小静压力。

常用的液柱式压力计有U形管、单管和斜管3种结构。所用液体有水银、水和乙醇。液柱式压力计在物理学、流体力学等课程试验中已有详细介绍,此处不作过多阐述。

2. 压力传感器

为实现压力测量远传、记录和控制,在压力检测中大量应用各种传感器,将被测压力参数转换成电信号,供远传的电子仪表测量、控制。汽车内燃机中的大多数压力测量均采用压力传感器进行。

因测量原理不同,压力传感器分为不同类型,如压阻式压力传感器、压电式压力传感器、电容式压力传感器、电阻应变式传感器、电感式传感器和霍尔压力式传感器等。

压阻式压力传感器精度高,频率响应快,工作可靠,容易实现数字化,它广泛应用于内燃机进气歧管压力(绝对压力和大气压力)、涡轮增压压力、燃油泄漏蒸气压力检测。电容式压力传感器主要用于内燃机机油压力检测。压电式压力传感器适合测量动态和准静态的压力变化或者压力波动,因此适合用于高压检测,如内燃机缸内燃烧压力、柴油机的共轨燃油喷射压力等。关于各种传感器的原理及特性读者可参考文献[11,12]及相关说明书。

因价格原因,目前,用于内燃机缸压测量的传感器中,压电式传感器多用于实验室研究

开发，压阻式传感器多用于内燃机产品中的缸压监控。

3.3.2　内燃机缸内动态压力测量与示功图制取

内燃机的能量转换是在工作循环的过程中完成的。在一个工作循环的进气、压缩、燃烧、膨胀和排气等过程中，标志工质的状态参数——压力 p、温度 T、活塞顶容积 V（反映比容积或密度）都在不断地变化。目前常用一个工作循环的 p-V 示功图（横坐标是 V）或 p-φ 压力图（横坐标是曲轴转角 φ）来反映能量转换的完善程度和每一工作循环做功能力的大小。为提高内燃机性能，研究示功图的规律是非常必要的。示功图与压力图简图见图 3-14。压力图以压缩上止点为坐标原点，它是示功图的展开图。

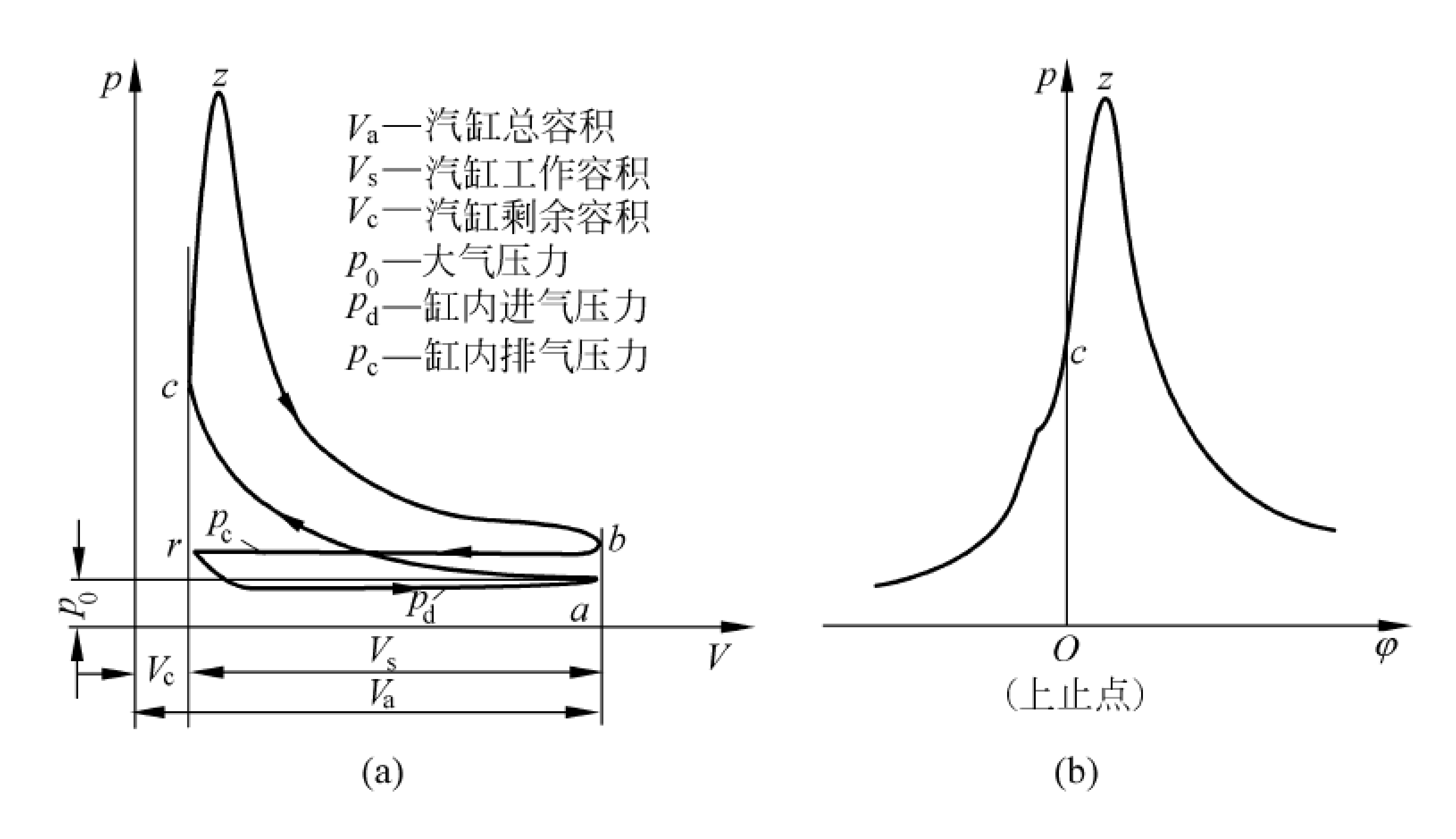


图 3-14　自然吸气四冲程内燃机示功图与压力图

(a) 示功图；(b) 压力图

示功图或压力图涉及缸内动态压力和曲轴转角 φ（可换算为活塞顶容积 V）两个参数的测量问题。制取示功图所用的仪器有简单示功仪、机械示功仪、气电示功仪以及现代的应变式示功仪和压电式示功仪。特别是压电式示功仪，由于具有优良的特性而获得广泛的应用。当前微型计算机技术的采用，高速数据采集和实时处理功能的实现，都大大扩展了示功图的功能，提高了测试精度和分析计算效率。

目前，内燃机示功图的制取主要应用压电式压力示功仪。

1. 测量的基本方法

压电式示功仪是把汽缸压力、曲轴转角等非电量通过传感器转换为电量，经放大器放大和信号处理后，由信号采集系统进行采集，再由显示记录装置进行显示的一种专用测量仪器。它具有压力和温度测量范围广、分辨能力高、响应性能好、结构紧凑、尺寸小、耐用等特点。其关键部件是压电晶体传感器（后文简称压电传感器）。

压电传感器的结构类型，主要有有水套冷却和无水套冷却两种（如图 3-15(a)、(b)所

示)。此外,还有和火花塞做成一体的结构,这需要根据所指定的火花塞来专门制造,由于无须在缸盖上加工安装孔,所以能为示功图的制取带来安装上的方便(如图 3-15(c)所示)。

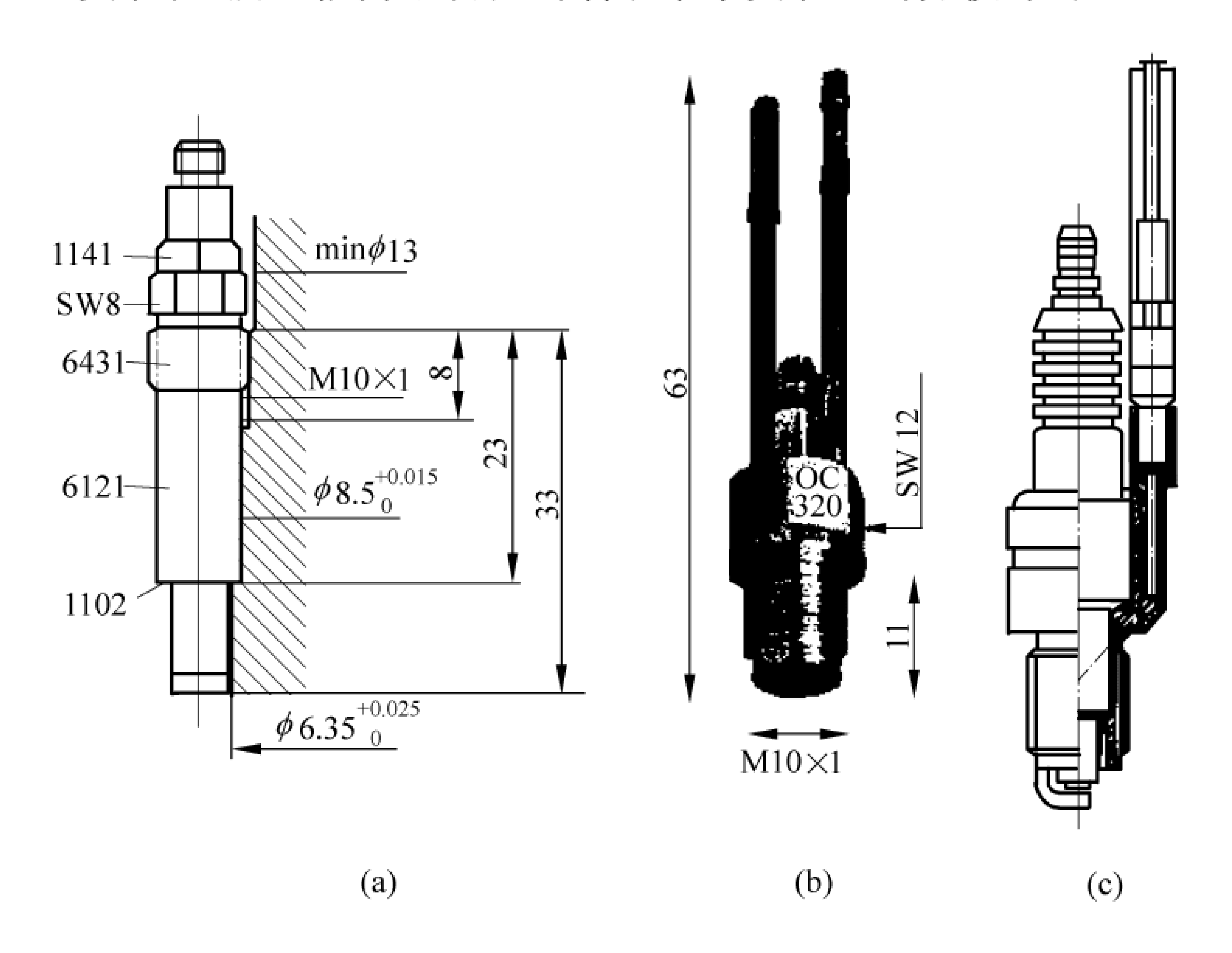


图 3-15 压电式传感器的结构形式

(a) 无水套冷却;(b) 有水套冷却;(c) 与火花塞做成一体

2. 测量过程中应注意的问题

1) 压电传感器的标定

标定方法有静态法和动态法两种。静态压力特性标定法是确定传感器所受压力和示功仪指示值之间的对应关系,还包括检查压力特性的直线性,有无迟滞以及漂移等现象。迟滞现象会使示功图的面积变大,严重影响计算值的准确性。

静态标定法一般使用砝码式标准活塞式压力计进行,也可用专门制作的标定仪,使用起来比较方便。

动态压力标定法也叫瞬态响应法,其目的是要得到它的频率特性,以便在使用时根据它的输出响应得到准确的输入信号。动态标定有两种方法,一种是对传感器输入"已知"频率及幅值的压力信号,记录它的输出,称为对比法;另一种是通过激波管产生一阶跃压力,施于被校传感器上,根据其输出曲线求得其频率响应特性,称为激波管动态校正,是更为基本的动态标定方法。一般压电示功仪的频率响应相当高,实际测量示功图时没有问题。关于动、静态标定方法的进一步信息可参见文献[12]及相关说明书。

2) 传感器的安装

对于现代汽车内燃机来说,内燃机结构非常紧凑,安装位置极其有限。为了缩短燃气压

力通道,一般要求传感器承压面能靠近燃烧室。由于压力波效应,长的压力通道会在示功图上出现高频的压力波,主要出现在上止点附近。这时需要特殊处理才能消除。

图 3-16 所示为一个典型的安装结构。汽车内燃机上常采用小型压电传感器 2,安装在过渡套 1 中,再通过缸盖水套固定在燃烧室壁上。

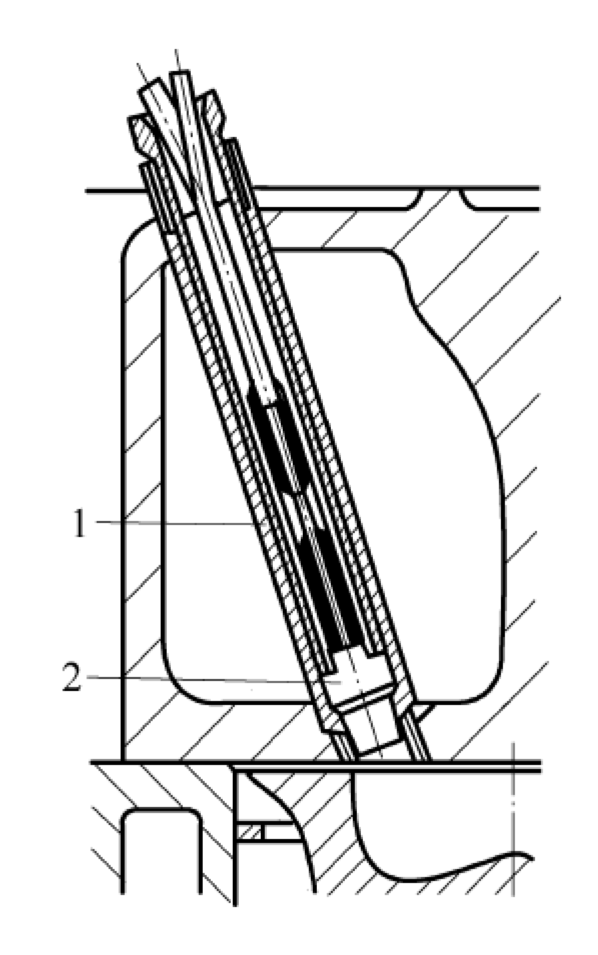


图 3-16　通过水套安装法
1—过渡套;2—压电传感器

对柴油机而言,由于缸盖下平面比较厚,因此,可通过底面打孔安装。这样,用起来就简单方便些。

目前,对于现代汽油机而言,缸压传感器通常与火花塞做成一体,柴油机缸压传感器与电热塞装在一起。

3) 示功图的测量误差

图 3-14(a)示功图上封闭曲线面积的代数和(封闭面积有的代表正功,有的为负功,可参阅内燃机原理相关图书)反映内燃机一个循环所做指示功的大小。试验时,测得的是压力图,由压力图再转为示功图。压力图上压缩上止点右侧压力做膨胀正功,而左侧压力则是压缩负功,见图 3-14(b)。如果上止点定位略有偏差,则部分正功被算为负功;或反之,负功算为正功。这样一来,一方减小而另一方增大,就会造成更大偏差,这就是压缩上止点定位极为重要的原因。测功误差还包括压力及转角的测定误差以及压力波形畸变带来的误差,可通过各种方法加以消除或校正。

3.4　其他热力状态参数的测定

内燃机进行试验时,除各种压力测定外,还需测定各种温度、大气湿度和燃油密度。这些热力状态参数会影响实际进入内燃机汽缸的空气量和燃料量,必然会对主要性能指标(功率、油耗、排放)产生较大的影响,使得测量的数据没有可比性。为此,需测定这些参数并根据标准进行修正,详细内容见第 4 章。

3.4.1　液温、进排气温及大气温度的测量

内燃机试验中的温度测量主要包括冷却液温度(进、出水温度)、机油温度、燃油温度、中冷前后进气温度、排气温度和环境温度等。

为了进行专项性试验研究,有时还需测定某些零件的温度(如汽缸盖、排气门、缸套、活塞),因为这些参数能直接反映或影响内燃机的性能,尤其是可靠性。

内燃机水温、油温、进气温度等的测量通常用热电阻传感器来进行。热电偶也可以测量内燃机的所有温度,但常用于测量排气温度。

1. 热电阻温度计

金属导体和半导体的电阻值是温度的函数，见式(3-4)。只要知道了这种函数，并能测出导体的电阻值，就能知道热电阻本身的温度，从而知道该电阻所处的环境或介质的温度。式(3-4)是一定温度范围内的近似关系。

$$R_t = R_0[1+\alpha(t-t_0)] \tag{3-4}$$

式中：R_t——热电阻在 t(℃)时的电阻值，Ω；

R_0——热电阻在 t_0(℃)时的电阻值，Ω；

α——热电阻的电阻温度系数，$℃^{-1}$。

电阻温度系数 α 对于大多数金属导体来说并不是一个常数，而是温度的函数。但在一定的温度范围内，α 可近似看作常数。不同的金属导体，α 保持常数所对应的温度范围不同。因此用来做热电阻的材料应满足以下要求：

(1) 电阻温度系数 α 要大，电阻温度系数越大，制成的温度传感器的灵敏度越高。电阻温度系数与材料的纯度有关，纯度越高，α 值越大。因此纯金属的 α 比合金高。

(2) 材料应具有比较大的电阻率，这样可使热电阻体积较小，热惯性较小。

(3) 在测温范围内，材料应具有稳定的物理化学性质。

(4) 在测温范围内，希望电阻温度系数 α 保持常数，便于电阻与温度关系近于线性或为平滑的曲线，而且这种关系应有良好的重复性。

(5) 易于加工复制。

比较适于制作热电阻的材料有铂、铜、铁及镍。目前常用一种热敏电阻的半导体测温元件，它的温度系数比金属丝大一个数量级。此外，使用热电阻温度计时，因电阻和温度系数进行良好匹配常有困难，因此，常用适当电路进行补偿。

2. 热电偶温度计

1) 基本原理

热电偶是利用两种不同导体 A 和 B 之间的“热电效应”制成的一种测温元件，也就是说当两个接点的温度不同时，回路中就会产生热电势。其测量原理的示意图如图 3-17 所示。

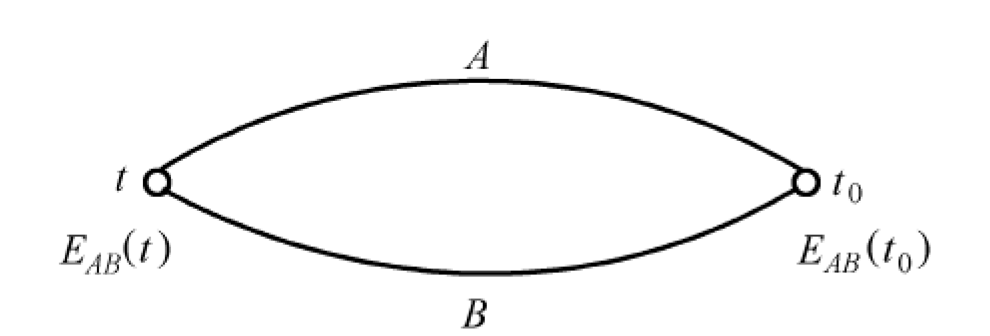


图 3-17 两种不同导体组成的回路

在热电偶回路中，A 与 B 导体称为热电极，两导体焊接在一起的一端 t 为工作端，测温时要插入被测的介质中，故又称热端。另一端 t_0 通过连接导线引向测温仪表，称为冷端，又叫做自由端，要求置于恒定温度中。如果回路中插入另一种金属时，其两端节点的温度必须相同，以保证热电偶两端产生的电动势不受意外电动势的影响而发生变化。

闭合回路热电势的大小取决于两种金属的性质和两端的温度，与金属导线尺寸、导线途中的温度及测量热电势在电路中所取的位置无关。即当 A、B 材料选定后，热电势 $E_{AB}(t,t_0)$

是温度 t 和 t_0 的函数差，可表示如下：

$$E_{AB}(t,t_0) = f(t) - f(t_0) \tag{3-5}$$

式中：$E_{AB}(t, t_0)$——热电势；

t,t_0——两个接触点的温度；

函数 f 的形式与两种金属的性质有关。

若冷端温度 t_0 保持不变，则热电势 $E_{AB}(t,t_0)$ 为 t 的单值函数，这样就可以通过测量 $E_{AB}(t,t_0)$ 测出被测温度 t。

内燃机试验常用的热电偶结构有普通型和铠装型，目前铠装型用得较多。所谓"铠装"就是在产品的最外面加装一层金属保护，以免内部的效用层在运输、安装和使用时受到损坏。图 3-18 所示的普通型热电偶结构主要由热电极偶丝、接线座、接线柱、保护管和接线盒组成。图 3-19(a)所示为铠装型热电偶结构形式，由保护套管、绝缘材料、热电极组合而成。这种热电偶工作端有露头型、接壳型、绝缘型三种，如图 3-19(b)所示。特点：露头型的优点是响应快，适用于良好环境，但寿命短；绝缘型响应比前者慢，寿命长，适用于较恶劣环境；接壳(即接地)型介于二者之间。图 3-19(c)所示为几种铠装热电偶温度传感器图片。

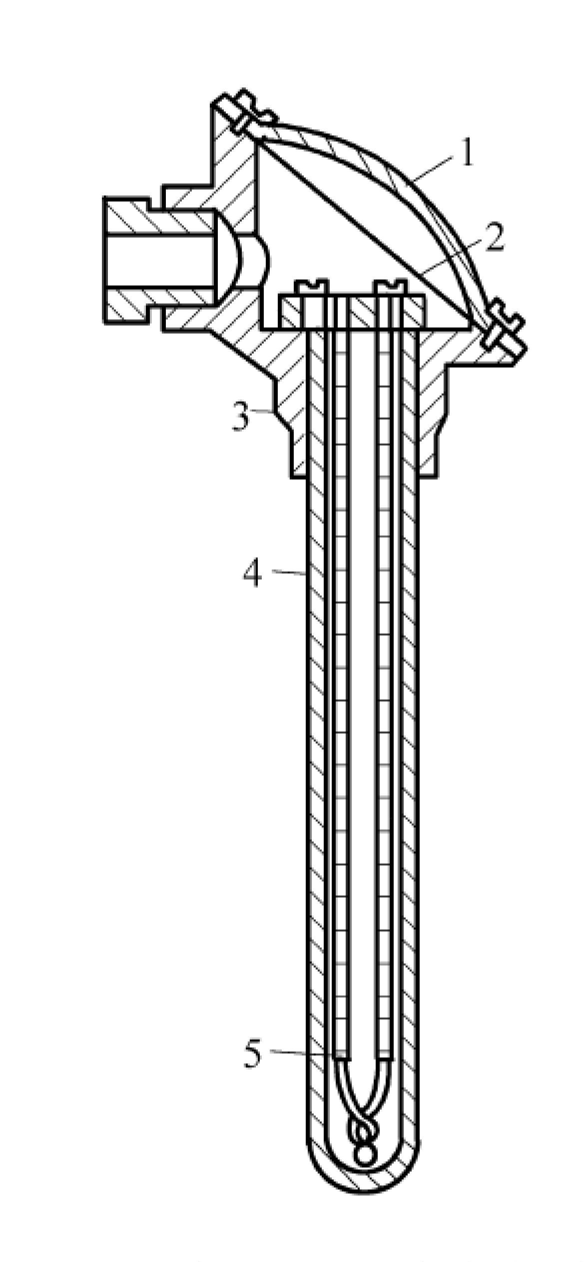


图 3-18　普通型热电偶结构简图

1—接线盒；2—接线柱；3—接线座；4—保护管；5—热电偶丝

铠装热电偶可以做得很细、很长，并具有能弯曲、耐高压 、热响应时间快和坚固耐用等许多优点。

2）热电偶主要特性

由于各种材料具有不同的物理化学性质，特别是不同的材料所制成的热电偶在相同的温差下所产生的热电势差别很大，因此，对制造热电偶的电极配对材料有一定的要求。这些要求是：能产生较高的热电势，性能稳定，抗氧化、抗腐蚀能力强，电导率高，制造容易等。热电偶的主要特性列于表 3-1 中。

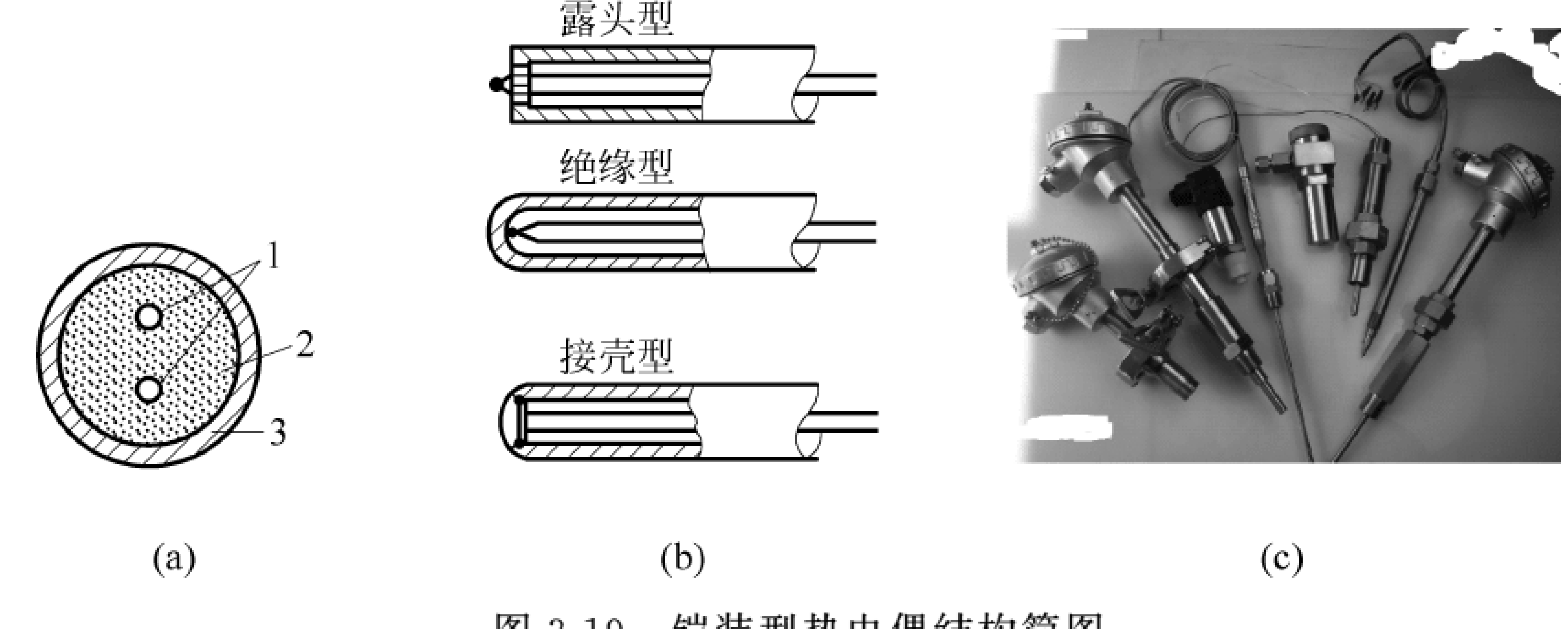


图 3-19　铠装型热电偶结构简图

1—热电极；2—绝缘材料；3—保护套管

表 3-1 常用热电偶主要特性

名称	分度号	测温范围/℃		$t=100$℃时的热电势/mV	允许误差		特点及用途
		短期	长期		温度/℃	偏差	
铂铑$_{30}$-铂铑$_6$	LL-2	0～1800	0～1600	0.034	≤600 >600	±3℃ ±0.5%t	精度高,稳定性好,可作标准传递、高温测量
铂铑$_{10}$-铂	LB-3	0～1600	0～1300	0.643	≤600 >600	±2.4℃ ±0.4%t	性能稳定,复现性好,可用作一二等标准传递,高精度测量
镍铬-镍硅 镍铬-镍铝	EU-2	0～1200	0～1000	4.10	≤400 >400	±4℃ ±0.75%t	长期使用稳定,线性好,常用于测排气活塞、排气门的温度
镍铬-考铜	EA-2	800	600	6.95	0～400 >400	±4℃ ±1%t	灵敏度高,廉价,可用到−200℃,适用于还原和中性介质
铜-康铜	CK	300	200	4.26	−40～400	±0.75%t	稳定性、复现性好,廉价,易氧化,可测到−200℃,可作二等标准热电偶

3）热电偶冷端温度的影响及其补偿方法

前已述及,如果要直接测出介质的温度,则必须使测温仪表所指示的数值只与热端的温度有关,这就得保持冷端的温度恒定不变。这种保持冷端温度恒定以消除因其温度的变化而引起测量误差的方法就称为冷端温度补偿。具体温度补偿方法很多,如冷端恒温法、冷端温度校正、补偿导线法和热电偶冷端补偿器。

4）安装与校正

热电偶应选择合适的安装位置。由于热电偶所测得的温度仅仅是工作端周围一小部分区域的温度,所以在安装时要选择具有代表性的测量点,并应尽量避免热辐射、强磁场和强电场的影响。测内燃机排温时,热偶端头应距内燃机排气歧管出口或涡轮增压器出口50 mm 处测量,并位于排气连接管的中心,逆气流方向插入。安装示意图如图 3-20 所示。

新一轮试验前,热电偶应进行校正。长期使用也要定期校正。校正方法是用标准热电偶和被测热电偶在同一校验炉中进行对比。

最后应该指出,温度测量是一个复杂的问题,前面谈到的主要是稳定温度的测量问题。内燃机试验中,还会涉及高速脉动气流、动态温度等的测量,此时由于热惯性的关系,测温的动态响应问题十分突出。限于篇幅,本书不再述及,读者可参阅相关文献资料。

3.4.2 大气湿度和燃油密度的测定

1. 大气湿度

常用的大气湿度测量仪有毛发湿度计、干湿球湿度计,还有电阻式和电容式湿度传感器

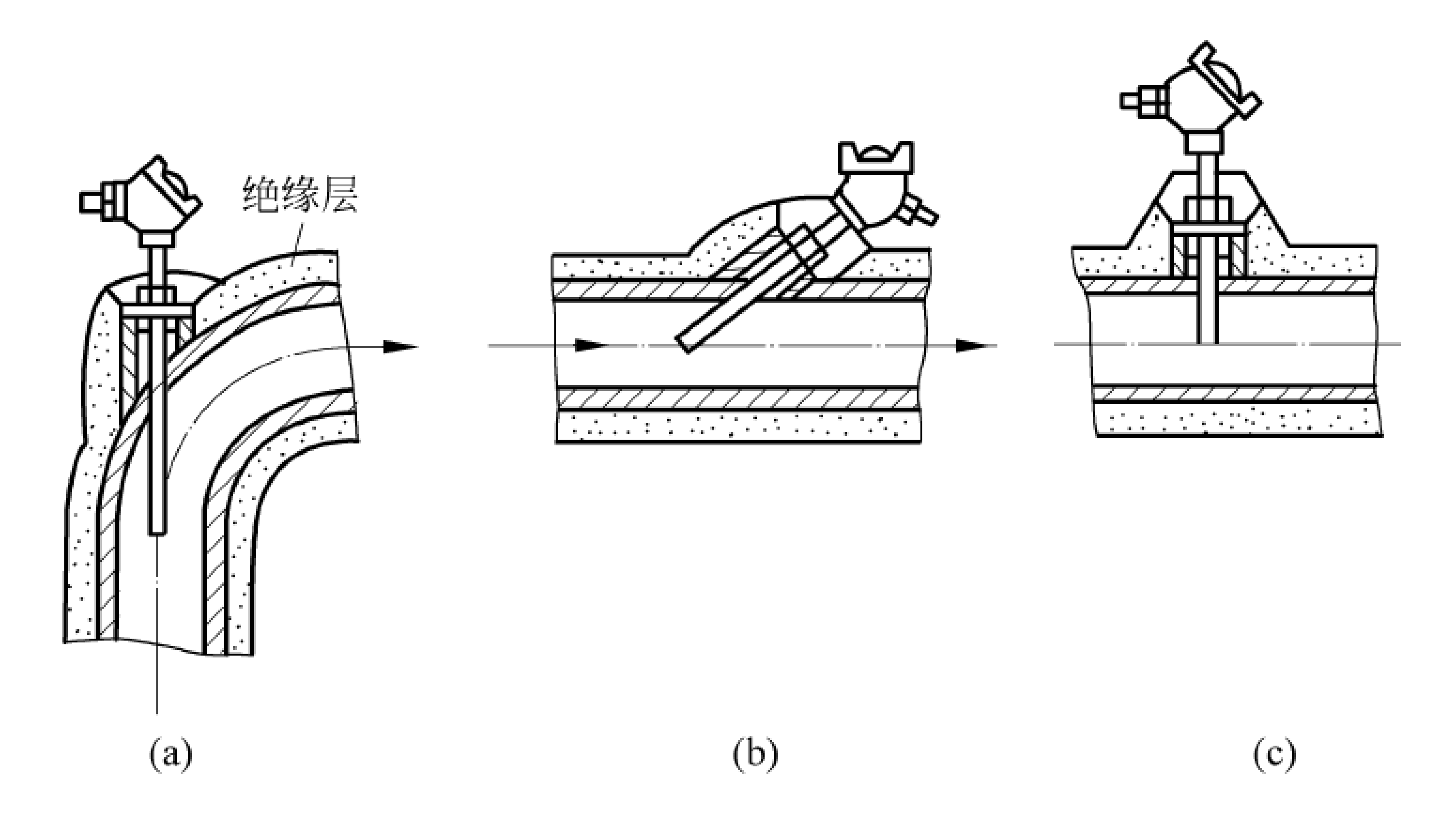


图 3-20　热电偶安装方式
(a) 水平安装；(b) 倾斜安装；(c) 垂直安装

与变送器。国家标准 GB/T 18297—2001《汽车内燃机性能试验方法》规定，进气湿度的测量是在实验室内不受阳光和热辐射的部位测量，采用抽风式干湿球温度计，通过查抽风式湿度计用湿度图得到水蒸气分压，进而计算大气湿度及相对湿度。详细内容参见标准 GB/T 18297—2001《汽车内燃机性能试验方法》。随着传感器技术的进步，湿度传感器得到了广泛应用，通过湿度传感器可直接测得大气湿度。

1）干湿球湿度计

干湿球测湿法采用间接测量方法，通过测量干球、湿球的温度经过查表计算得到湿度值。干湿球湿度计由两支相同的温度计 A 和 B 组成，如图 3-21 所示。A 直接指示室温，而 B 的感温泡上裹着细纱布，布的下端浸在水槽内。如果空气中的水蒸气不饱和，水就要蒸发，由于水蒸发吸热，而使 B 的感温泡冷却，因而湿温度计 B 所指示的温度就低于干温度计 A 所指示的温度。环境空气的湿度小，水蒸发就快，两支温度计指示的温度差就大。干湿球温度测量中要用小风扇强制吹风，湿包测点处的风速保持为 3～4 m/s。由于湿球温度测量中要用水，所以这种湿度计只能在 0℃以上的环境测湿。

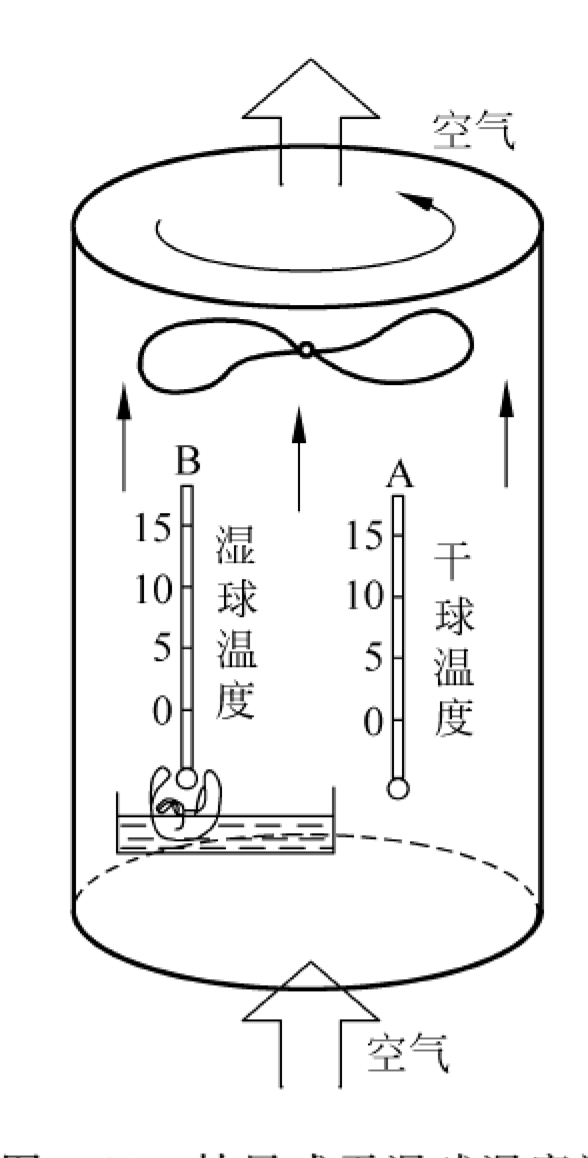


图 3-21　抽风式干湿球湿度计

2）电子湿度计

利用某些金属盐（氯化锂、氯化钙等）在空气中的强吸湿性特点进行测量。吸湿使盐中的水分增加，直到盐中的水分与空气中的水分达到平衡为止。盐的平衡含水量与空气相对湿度一一对应，相对湿度越大，盐中的平衡含水量越大，盐的电阻越小；反之，空气相对湿度

越小，盐的电阻越大。利用这个原理，常用氯化锂作为电阻式湿度计的金属盐用料，在湿度测量和控制中使用。

2．燃油密度测量

在进行内燃机试验时，为保证燃料消耗量测量的准确性，对于易挥发的燃料如汽油，通常采用容积式油耗仪进行测量，此时，需要知道燃料的密度。

燃油密度的测量常采用两种方法，一种是利用密度计进行测量；另一种采用天平法进行测量。国家标准 GB/T 1884—2000 建议的测量方法是密度计法。标准中的主要内容如下：

1）密度的概念

密度是指在一定温度下，单位体积内所含液体媒介（原油）的质量。符号 ρ，单位 g/cm^3 或 kg/m^3。油品的密度与温度有关，通常用 ρ_t 表示温度 t 时油品的密度。国标规定 20℃ 时，石油及液体石油产品的密度为标准密度。

2）使用的仪器

（1）密度计量筒：由透明玻璃、塑料或金属制成，其内径至少比密度计外径大 25 mm，其高度应使密度计在试样中漂浮时，密度计底部与量筒底部的间距至少有 25 mm。

（2）密度计：玻璃制。应符合标准 GB/T 1884—2000 中的规定。

（3）温度计：范围、刻度间隔和最大刻度误差应符合标准 GB/T 1884—2000 中表 2 的规定。

3）测定原理

使试样处于规定温度，将其倒入温度大致相同的量筒中，将合适的密度计放入调好温度的试样中，让它静止。当温度达到平衡后，读取密度计刻度读数和试样温度。用《石油计量表》把观察到的密度计读数换算成标准密度。

进一步信息读者可查阅标准 GB/T 1884—2000《原油和石油产品密度测定法》(密度计法)。

利用密度计测量燃油密度方便，可初步估算燃油密度，但精度不高；采用天平法进行测量精度较高，但不如前一种简单。其测试原理示意图如图 3-22 所示。

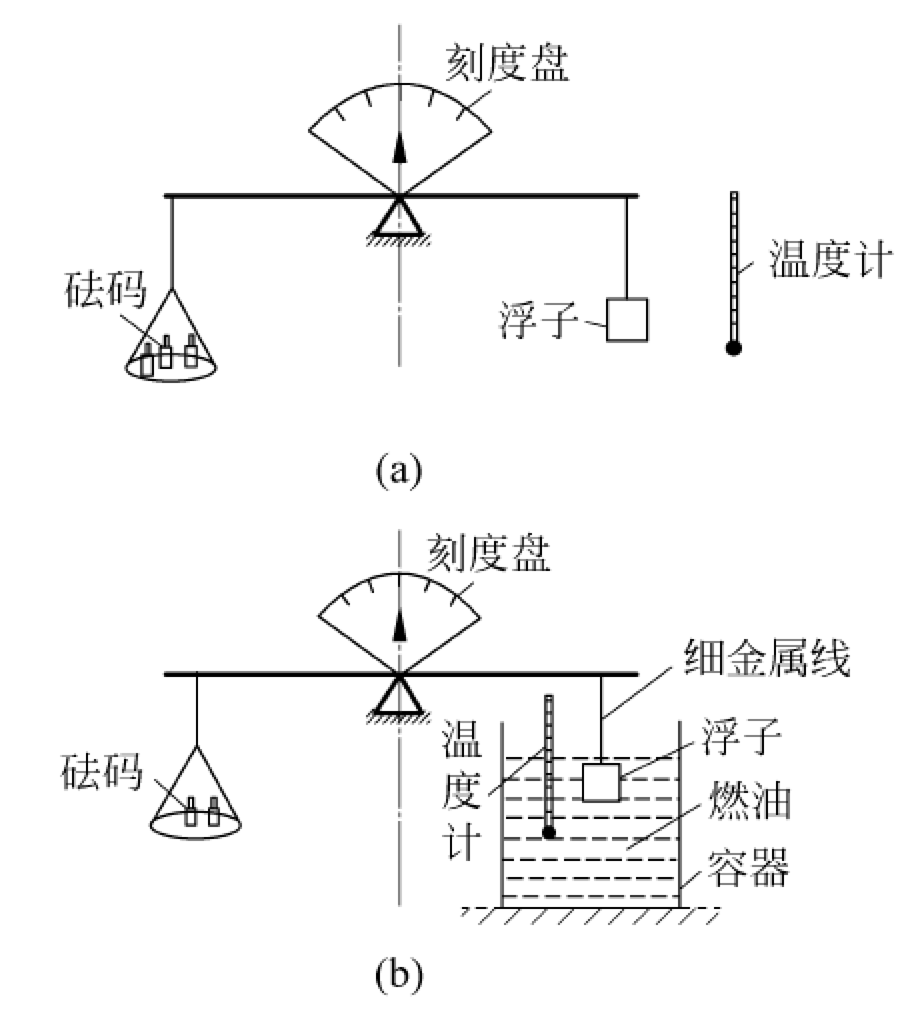


图 3-22 天平测量燃油密度示意图

从图 3-22(a) 中可看出，测量燃油密度前，天平两端分别放有砝码和浮子，且处于平衡状态，当将具有一定体积的浮子放入装有燃油的容器时(图 3-22(b))，天平会出现向砝码一边倾斜现象，为使天平平衡，需要去掉一边的砝码(有不同等级重量的砝码)，最终使天平平衡，根据去掉的砝码重量及浮子体积，即可计算出在某温度下的燃油密度(因温度会影响燃油密度)。

3.5　进气流量及燃油消耗率的测定

3.5.1　进气流量的测定

测量进气流量的目的是计算空燃比、充气效率和废气再循环率等重要参数。充气效率是决定内燃机输出功率的重要因素；废气再循环率则与排放、经济性和动力性相关；而通过空燃比可分析内燃机的燃烧过程。进气流量与内燃机的动力、经济性和排放特性都有直接或间接的关系。因此，内燃机试验时都要使用空气流量计来测定进气流量。

测量空气流量的方法很多，如节流差压法、测速法、热线风速法、激光（光学多普勒效应）法、振荡测频法、柱塞法等。转子流量计也是其中的一种，其测量误差可以小于 1%。对于这些气体流量计，只要测量范围及测量精度满足试验要求，都可以用于内燃机稳态试验的流量测量。

在内燃机试验台上进行稳态工况测试时，因为不论工况稳定与否，进气流动都是脉动的，因此需要在流量计后面加装稳压箱，使稳压箱前的管道中出现（层流）稳定流，则可使用稳（层）流的流量计，以避免在脉动流中进行动态测量而影响测量精度。

在电子控制燃油喷射内燃机中，空气流量的测量不仅要求有一定的测量精度，而且还要求有很好的动态响应速度。用于该系统的空气流量计有多种形式，目前常见的有热膜式、热线式、涡流式、文丘里管流量计、层流流量计等。为保证测量精度，这些流量计在设计过程中需要考虑连接传感器前后管径、长度大小及长度与管径之比（通常传感器前的管长要大于 6 倍的管径，传感器后的管长要大于 5 倍的管径）。

现以热膜式、热线式气体质量流量计为例简要说明其原理。

1. 热线式空气质量流量计

1）工作原理

当气流通过加热的电阻丝时，热量被风吸收，电阻丝变冷，温度下降，风速越大，下降越多。而电阻丝的电阻又随温度而变化。因此可以通过测量热线电阻来确定气流速度，这是热线风速仪的基本原理。目前使用的恒温法热线风速仪是将风速仪的热线探头作为惠斯登电桥的一臂，见图 3-23 中的 R_H（热线电阻），电桥的另外三臂为图中的 R_K、R_A 和 R_B。测量时由仪器电源 A 给 R_H 供电，使其温度高于空气温度。当不进气时使电桥保持平衡，出现气流后，因热线电阻改变而使电桥失去平衡。如果此时电源 A 自动改变供应热线的电流，使电桥恢复平衡，即恢复热线温度，则电流的变化值就反映了风速的大小。由于电流变化在精密电阻 R_A 上引起同样的电压变化，所以 R_A 上的电压降即为此风速仪的输出信号。这种热线风速仪因为工作时一直反馈保持热线温度不变，即维持热线与冷线的温差不变，故以恒温法为名。

2）结构

恒温热线式空气流量计的结构如图 3-24 所示。热线式空气流量计由防护网、取样管、

白金热线、温度补偿电阻、控制线路板等组成。白金热线的作用是感知空气流量，温度补偿电阻(冷线)的作用是根据进气温度进行空气流量修正，热线和冷线的电阻均随温度而变化。防护网的作用不仅是防止灰尘或异物进入，更重要的是前网用于进气整流，后网用于防止内燃机回火时把铂丝烧坏。防护网控制线路板的作用是控制热线电流并产生输出信号。

根据白金热线在壳体内安装的部位不同，又可分为主流测量方式和旁通测量方式两种结构形式。图 3-24 所示的流量计就是主流测量式结构。从图中可看出取样管 2 置于主空气通道中央，两端有金属防护网 1，防护网用卡箍固定在壳体上。

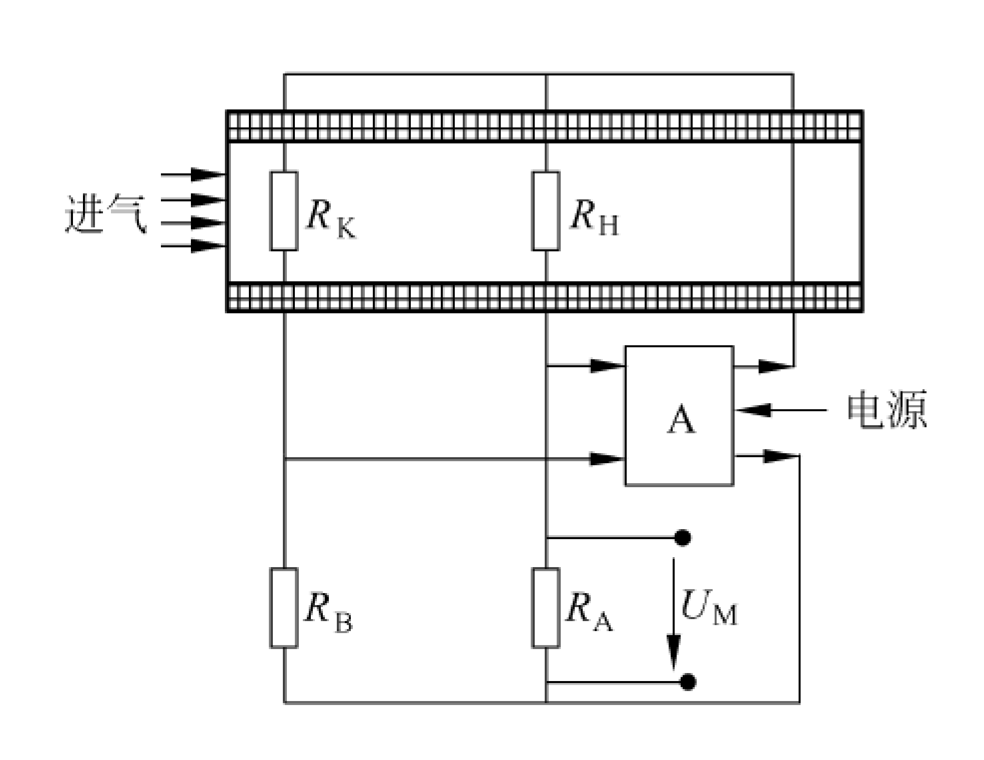


图 3-23 热线式空气流量计基本电路图

A—混合集成电路；R_H—热线电阻；R_K—温度补偿电阻；R_A—精密电阻；R_B—电桥电阻

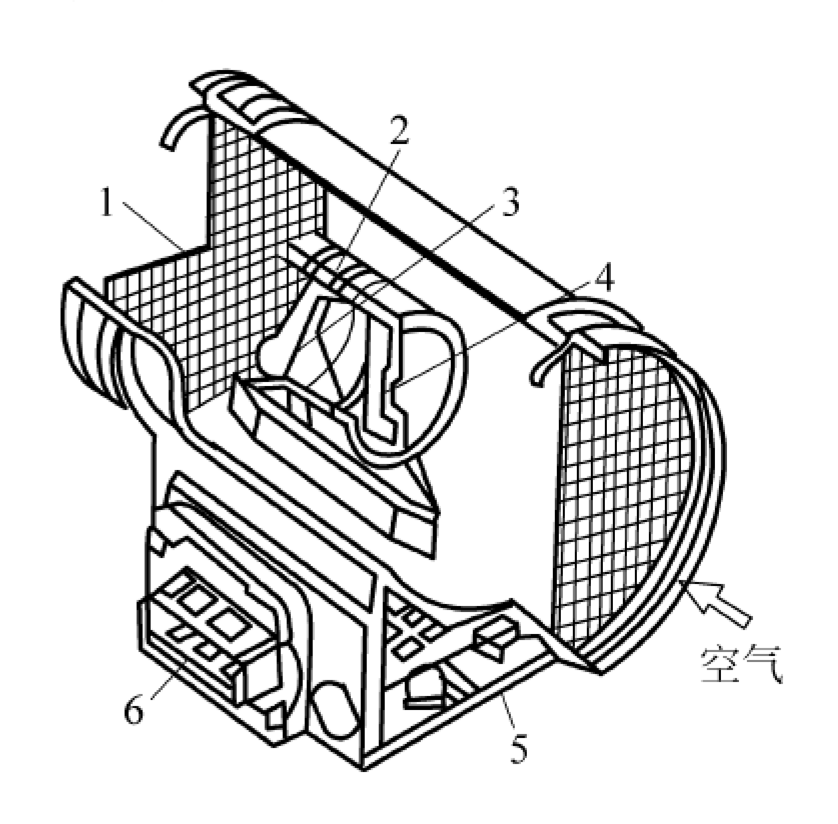


图 3-24 热线式空气流量计结构

1—防护网；2—取样管；3—白金热线；4—温度补偿电阻；5—控制线路板；6—电器接口

2. 热膜式空气质量流量计

热膜式空气质量流量计的结构和工作原理与热线式空气流量计基本相同，只是将发热体由热线改为热膜。热膜是由发热金属铂固定在薄的树脂上构成的，其结构如图 3-25 所示。这种结构可使发热体不直接承受空气流动所产生的作用力，增加了发热体的强度，提高了工作可靠性。

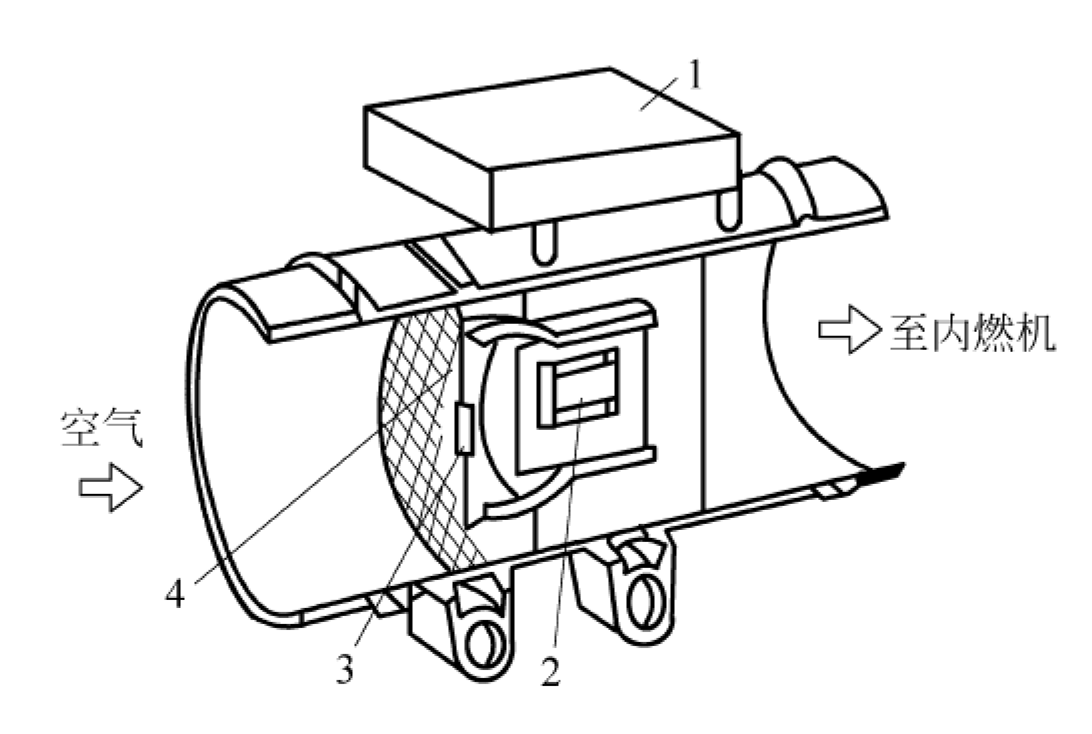


图 3-25 热膜式空气流量计结构

1—控制电路；2—热膜；3—温度传感器；4—金属网

热膜式空气质量流量计对小流量敏感，响应时间短，量程范围宽，测量精度高，特别适用于流量测控精度要求高的场合，可用于直径(DN)50 至直径(DN)1200 管道，压力达 1.6 MPa，气体温度可达 100℃，并适用于各种测量环境和各种气体流量的测量。该仪表安装简单，编程、设定方便，精度高，寿命长，可靠性高，可用于测量一些危险性的气体。

总的来说，热膜式、热线式空气流量计测量的均是进气质量流量，而不像孔板流量计那样只是测定容积流量。它们已把空气密度、海拔高度等影响因素考虑在内，所以可以得到精确的空气流量信号。此外，它们探头的几何尺寸较小，对气流的干扰也小。由于热线、热膜的热惯性小，也比其他流量计更适于非定常气流的测量。不过热惯性的存在总会对频率响应有所影响，测量线路上都要加入补偿电路。热线式空气流量计是发热体直接承受空气流动所产生的作用力，而热膜式不是，因此热线式比热膜式空气质量流量计的使用寿命短。

为保证传感器测量精度，定期检查和校验是必不可少的，如传感器被污染时会影响测量精度。

3.5.2　燃料消耗率的测定

评价内燃机的性能，不仅要看它的动力性，即输出功率的大小，还要看它的经济性（即它在输出一定功时所消耗燃料的多少）。内燃机单位时间内消耗燃料的数量叫作燃料消耗量 G_f，可用容积或质量来表示。燃料消耗量的计算公式为

$$G_f = 3.6\Delta V\rho_f/\Delta t = 3.6\Delta m/\Delta t \tag{3-6}$$

式中：G_f——燃料消耗量或供油量，kg/h；

ΔV——燃料消耗容积，cm^3；

ρ_f——燃油密度，g/cm^3；

Δt——燃料消耗时间，s；

Δm——燃料消耗量，g。

燃料消耗量是整机在一定时间内消耗的燃料量，它只是反映了内燃机燃料消耗量的大小，没有考虑燃料消耗所获得收益的多少，不适合用作可比性的内燃机**经济性**评价指标。因此，需采用燃料消耗率，即内燃机获得一定输出功率所对应的燃料消耗量，单位是每千瓦小时消耗多少克燃料，作为内燃机燃料经济性的可比指标。其表达式如下：

$$g_e = \frac{G_f}{P_e} \times 1000 \tag{3-7}$$

式中：g_e——燃料消耗率，g/(kW・h)；

G_f——燃料消耗量，kg/h；

P_e——内燃机功率，kW。

测量燃油消耗量的方法可分为稳态测量和瞬态测量。具体来说有容积法、质量法、采用 Coriolis（科里奥利）效应的质量流量计及碳平衡法等。在进行内燃机稳态试验时，油耗测量通常采用容积法和质量法，前者一般用于汽油机，后者一般用于柴油机。如进行动态测试，为保证油耗测量精度，通常采用科里奥利质量流量计；进行整车转鼓试验时，内燃机的油耗测量一般采用尾气碳平衡法。

1. 容积法

容积法是使燃油通过一个已知容积的容器（如玻璃量瓶），然后测定消耗一定容积的燃

油所需的时间来计算容积耗油量。其常用的仪器由测量装置和显示仪两部分组成。图 3-26 所示为一种简易的典型容积测量装置结构示意图。该测量装置主要由液面检测器 1、量泡管 2 和阀门(N)组成。量泡管用玻璃材料制成,以利于检测和观察。量泡管是由多个由小到大的不同容积的量泡组成,每个量泡都准确地标定了容积的大小,作为计量单元。检测器 P 装在每个量泡的前后,油面降到 P_1 时的信号作为计量的开始,P_2~P_6 的信号作为不同容积计量时的结果。在内燃机试验台上,油箱至少应高于油耗仪 1.5 m,以保证靠重力自动供油。同时,在油耗仪与油箱之间的管路中应安装燃油滤清器,以避免杂质进入影响阀门的密封性。

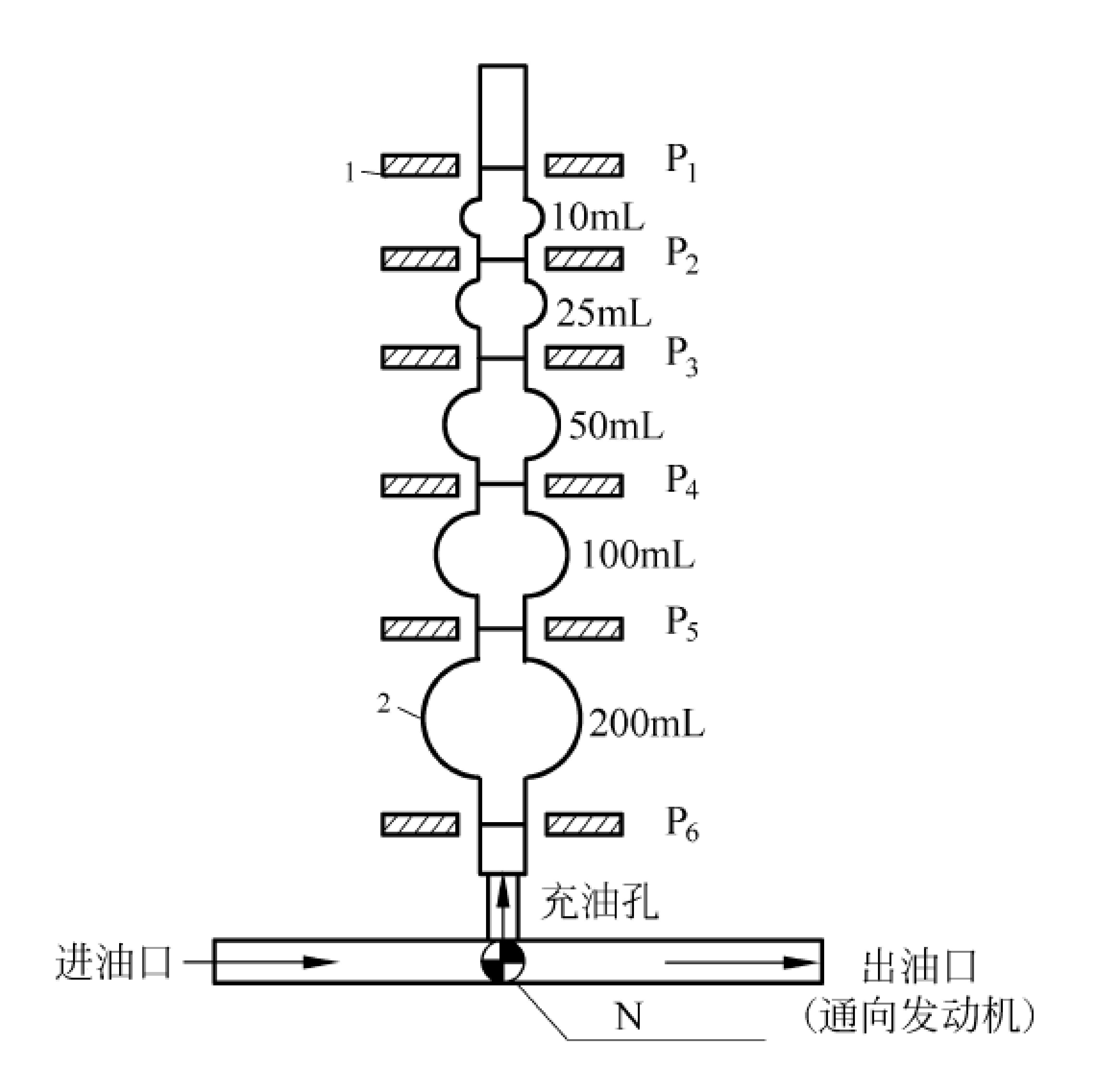


图 3-26 容积式油耗测量装置

1—液面检测器;2—量泡管;N—三通阀

工作时,打开 N 阀,充油开始,同时也给内燃机供油。当燃油到达液面检测器 P_1 时,关闭阀门充油孔 N。测量时,首先要选定计量单元的容积。选定的原则是要保证每次测量的时间不得少于 20 s,应根据试验时内燃机输出功率的大小来确定。测量开始时,按下测量键,同时关闭三通阀 N 的进油孔,使内燃机只使用量泡管中的油,然后记录测定开始到结束的时间,根据式(3-6)即可计算出 G_f。相同的工况应重复测量一次以上,求其平均值,以使测量更准确。

这种装置多用于汽油机台架,由于是定容积测量,记录的是一段时间,故不能作瞬态油耗的测量。

此外,基于容积法测量油量的仪器还有转子式、旋转活塞式、往复活塞式、膜片式、油泡式等。目前,活塞式流量传感器多用于整车燃油消耗的测量。

2. 质量法

所谓质量法即是测量来自测量容器中燃油的质量,具体有两种测量方法:一是测量设定的燃油质量所需时间;二是测量规定时间内所消耗的燃油量。

质量法的特点是能直接测出燃油消耗的质量,不需要测定燃油的密度。

质量法的测量装置最初大都由精密天平、秒表、三通阀和油杯等组成。测试前,油杯与砝码平衡。取下确定质量的砝码后,开始用油杯燃油进行测试,记录天平再次平衡所需的时间。由该时间与取下的砝码质量(即燃油消耗量),通过式(3-6)即可计算出 G_f,并由内燃机的输出功率 P_e 按式(3-7)求出燃油消耗率。

这种装置结构简单,为保证测量精度,每次测量所消耗的燃油量(即取出的砝码量),应

根据试验时内燃机输出功率的大小来确定，但应使每次测量的时间不得少于 20 s，以解决因内燃机扭矩和转速在短期内波动对测量精度的影响。相同的工况应重复测量一次以上，求其平均值，以使测量更准确。

随着测试技术的进步，现普遍采用传感器技术使测量自动化。图 3-27 所示的是具有自动控制的质量式油耗仪。该质量式油耗仪由称重装置和控制装置组成。称重装置通常利用天秤改制，一端为装油油杯，另一端为砝码或拉压（位置）传感器。控制装置由电磁阀和运算处理系统组成。电磁阀控制进入油杯的燃油，测量后油杯内燃油达到下限时电磁阀打开，进行充油；当油杯内燃油达到上限时多余的油会由油杯溢回油箱；测量时电磁阀封闭进油路，单独由油杯供油。在测量时，油杯中油量变化由称重传感器感知，或由另一端的位移传感器感知，变成一个电信号输出，再由二次仪表计算出设定时间内消耗的燃油质量，此时即可按式(3-6)算出单位时间内内燃机的燃油消耗量 G_f(kg/h)。该仪器量程一般为 0～10 kg，误差为±0.1%。这种测量方法使用方便，精度高。此外，油耗仪量程需与内燃机试验工况（或耗油量）相对应，以保证测量精度。

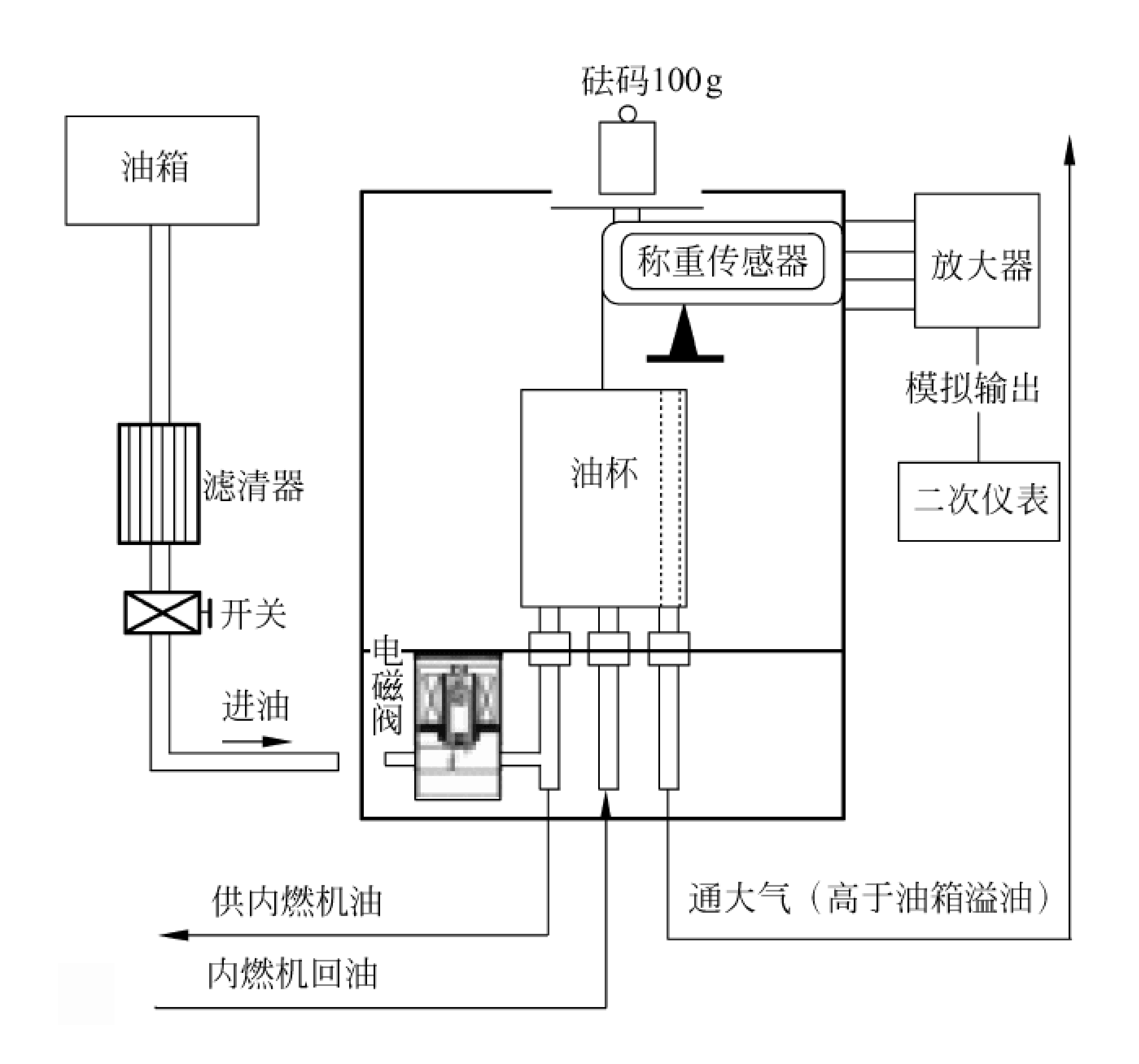


图 3-27　质量式油耗仪测量装置结构简图

上述的质量式油耗仪存在系统误差，即油杯中油面高度变化时，伸入油杯中的油管浮力的反作用力也在变化，造成称重时的系统误差。此项系统误差须根据汽车耗油量及油杯液面高度变化进行修正。

3. 科里奥利质量法

若流体在管内进行直线运动的同时处于一旋转系中，则会产生与质量流量成正比的科

里奥利力。利用这一原理制成的一种直接式质量流量仪表就称为科里奥利流量计。其原理如图 3-28 所示，当质量为 m 的质点以速度 v 在对 P 轴作角速度 ω 旋转的管道内移动时，质点受到两个分量的加速度及其力。

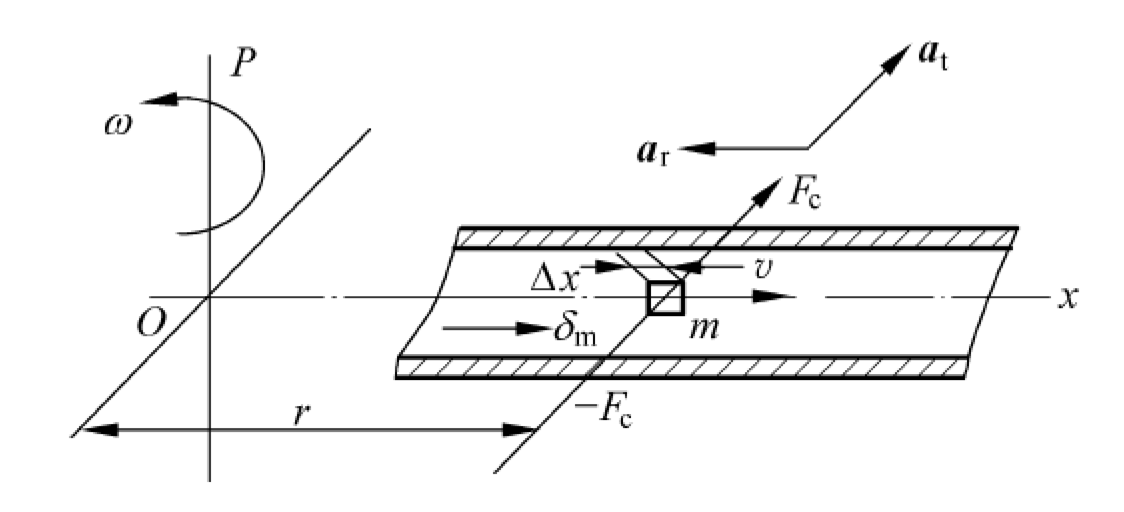


图 3-28 利里奥利质量法原理图

(1) **法向加速度 $\boldsymbol{a}_r$** 即向心加速度，其量值等于 $2\omega r$，方向朝向 P 轴。

(2) **切向加速度 $\boldsymbol{a}_t$** 即科里奥利加速度，其量值等于 $2\omega v$，方向与 $\boldsymbol{a}_r$ 垂直。于是在质点的 $\boldsymbol{a}_t$ 方向上作用着科里奥利力 $F_c=2\omega vm$，管道对质点作用着一个反向力 $-F_c=-2\omega vm$。

当密度为 ρ 的流体在旋转管道中以恒定速度 v 流动时，任何一段长度 Δx 的管道都将受到一个 ΔF_c 的切向科里奥利力。其表达式为

$$\Delta F_c = 2\omega v\rho A\Delta x \tag{3-8}$$

式中：A——管道的流通内截面积。

由于质量流量计流量即为 δ_m，$\delta_m=\rho vA$，所以式(3-8)可写为

$$\Delta F_c = 2\omega\delta_m\Delta x \tag{3-9}$$

因此，直接或间接测量在旋转管道中(如图 3-29 所示的 Q 形管)流动流体产生的科里奥利力就可以测得质量流量，这就是科里奥利流量计的基本原理。其结构图如图 3-29 所示。

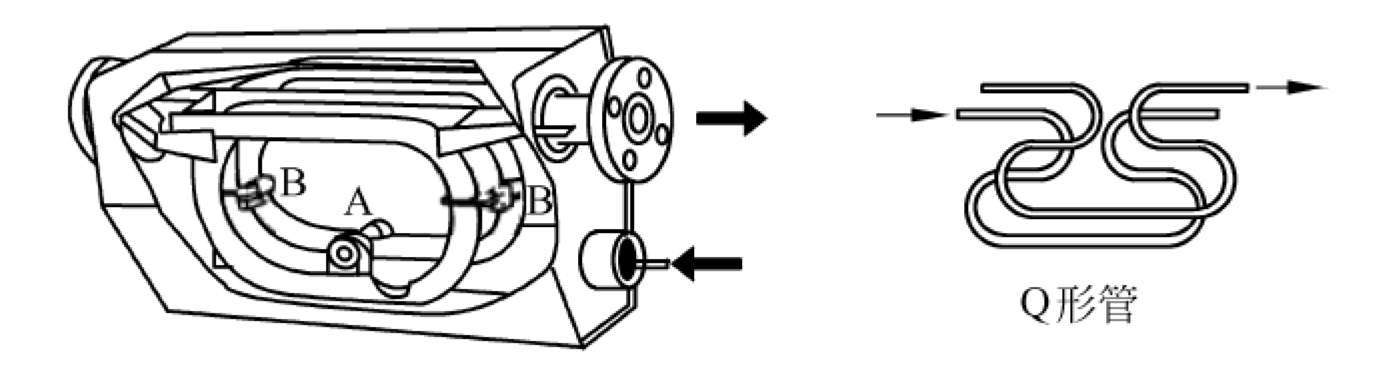


图 3-29 科里奥利质量流量计传感器实例

A—驱动线圈；B—检测探头

此种油耗仪适用于动态测试，测试的响应频率可达 10 Hz，比常规的称重法响应速度快，精度高。若与空气流量计结合使用可以计算出瞬时的空燃比。此种测量方法，管内壁磨损、腐蚀或沉积结垢会影响测量精确度，尤其对薄壁测量管的流量计更为显著，而且油路内的气泡也会影响测试，为此常在流量计前增加液压泵。

常用的连接方法如图 3-30 所示：连接方法 A 的动态性能好，精确，但是需要使用两个流量计，增加了成本；连接方法 B 采用一个流量计，但是由于冷却器(由于回油温度比较高，

为降低温度需增加冷却器）容量的增大，影响了动态性能。

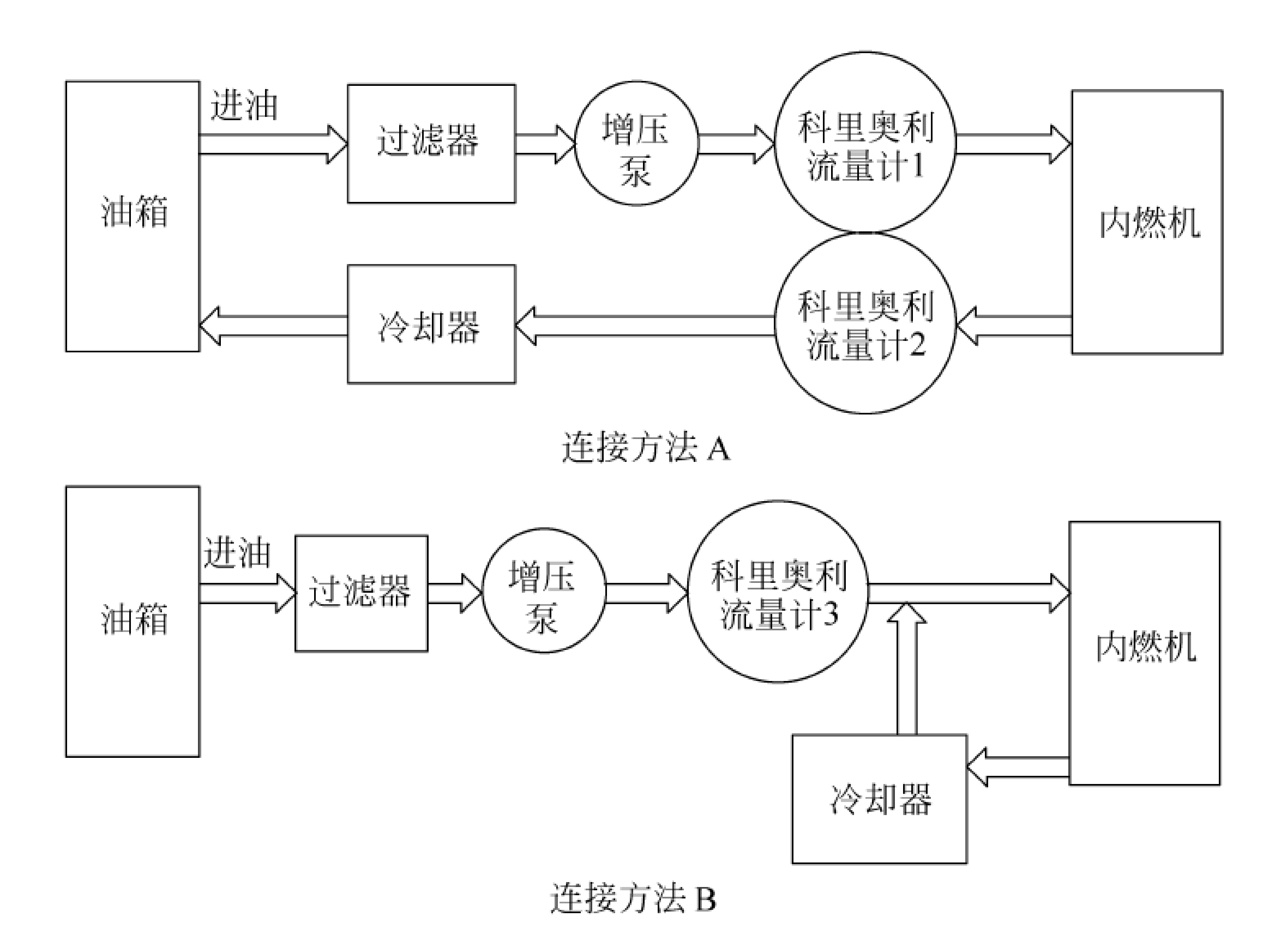


图 3-30　科里奥利质量流量计连接安装示意图

4. 碳平衡法

碳平衡法是利用所消耗燃油中的碳量与排气中 CO、CO_2、HC 所含碳的总量应相等的特点，由排气分析的结果来计算燃油消耗量的一种方法，即通过对尾气中 CO、CO_2、HC 容积排放量的分析计算，得到排气中单位里程内的碳元素含量，再与所用燃油中碳元素含量相比而间接得出燃油消耗量。其优点是不仅具有不解体测量油耗的优点，而且可获得与容积法、质量法相类似的精度及相当高的试验稳定性。百公里计算公式为

（1）对于装备汽油机的车辆：

$$FC = \frac{0.1154}{SG}[(0.866 \times HC) + (0.429 \times CO) + (0.273 \times CO_2)] \tag{3-10}$$

（2）对于装备柴油机的车辆：

$$FC = \frac{0.1155}{SG}[(0.866 \times HC) + (0.429 \times CO) + (0.273 \times CO_2)] \tag{3-11}$$

式中：FC——燃料消耗量，L/100km；

HC——测得的碳氢排放量，g/km；

CO——测得的一氧化碳排放量，g/km；

CO_2——测得的二氧化碳排放量，g/km；

SG——288 K（15℃）下试验燃料的密度，kg/L。

上述公式来自国标 GB/T 19233—2008。式（3-10）、式（3-11）中的系数 0.1154 和 0.1155是由公式（12＋氢-碳比）/120 计算获得的。氢-碳比采用固定值，汽油为 1.85，柴油

为 1.86。另外，标准允许将试验中的实测氢-碳比代入此两式求得新系数，按新系数计算燃料消耗量。公式中 0.273、0.429 及 0.866 分别是汽油、柴油排气中 CO_2、CO、HC 碳质量比率。

进一步信息可参考文献[15]及相关标准。

3.6 空燃比的测量

空燃比是一个可调参数，它对内燃机动力、经济性和排放性能影响极大，在内燃机原理书中已有详细的论述。在产品研发和科研工作中常常需要进行空燃比的测试。对于火花点火预制均匀混合气的内燃机，实用的空燃比范围变化不大，但少许变化就会对性能有重大影响。对于喷雾混合的柴油机而言，空燃比随负荷不同而大幅度变化，而且缸内各处，各时刻的空燃比都是不同的。一般只是测定最大油门位置时的平均空燃比，这是决定柴油机排放和最大动力性能的主要限制因素。空燃比的表达式为

$$\alpha = \frac{\text{单位时间内进入缸内的空气量}}{\text{单位时间内的燃料消耗量}} \tag{3-12}$$

还有用过量空气系数 ϕ_a 来表示的，它表示燃料完全燃烧时，实际供给的空气量与完全燃烧所需的理论空气量之比，表达式为

$$\phi_a = \frac{\text{实际供给的空气量}}{\text{完全燃烧理论空气量}} = \frac{l}{l_0} \tag{3-13}$$

式中：l，l_0——完全燃烧 1 kg 燃料实际供给的空气量和理论空气量。

测量空燃比的方法有多种，主要采用下列三种方法。

1. 通过测量进气量和燃料消耗量来计算空燃比

这种方法应用起来较简单，用同一时间内测量的进气量 G_a 和所测的燃料消耗量 G_f，利用式(3-12)即可计算出空燃比 α，或利用式(3-13)即可计算过量空气系数 ϕ_a。

在内燃机稳定工况时，这种方法具有高的可靠性，但存在下列问题：一是不适用于瞬态空燃比的测量；二是对于多缸机，只能测量平均的总空燃比，不能测量各缸的空燃比。而这两点对于控制排气污染是非常重要的。

2. 直接测量排气成分来计算空燃比

目前，广泛应用排气分析仪测量排气成分来计算空燃比，与空燃比有关联的成分有 CO_2、CO、HC 和 O_2。可根据这 4 种成分或其中 3 种成分，如 CO_2、CO 和 O_2 或 CO_2、CO 和 HC 来直接计算空燃比，由于测量排气成分的方法不同，可采用多种计算方法。但关键问题是确立排气成分与空燃比的关系。一般都认为，100 mol 空气与燃料 C_nH_m 中 X mol 的碳(C)与 Y mol 的氢(H)反应时，其燃烧反应式为

$$\begin{aligned}20.99(O_2)+X(C)+Y(H_2) \longrightarrow & A(CO_2)+B(CO)+\\ & C(H_2O)+D(H_2)+E(O_2)\end{aligned} \tag{3-14}$$

式中：A、B、C、D——燃烧生成物的物质的量；

E——多余氧的物质的量。

空气中的氮等惰性成分认为在燃烧前后不变，所以在公式中未列入。

氧气不足时，发生的部分水煤气反应的平衡常数 K 为

$$K = (C \times B)/(A \times D)$$

斯平特(R. S. Spindt)根据上式得出空燃比的计算公式为

$$\alpha = F_b \left[11.492 F_C \left(\frac{1 + 0.5R + Q}{1 + R} \right) + \frac{120(1 - F_C)}{3.5 + R} \right] \tag{3-15}$$

式中：F_b＝(CO 的物质的量＋O_2 的物质的量)/(CO 的物质的量＋CO_2 的物质的量＋CH 的物质的量)；

R＝CO 的物质的量/CO_2 的物质的量；

Q＝O_2 的物质的量/CO_2 的物质的量；

F_C——燃料中碳的质量百分比。

这种方法应用简单，不论何种燃料，只要知道它的组成，就可以应用。且它有明确的理论基础。

3. 测量排放样气中氧的浓度来计算空燃比

在这种测量方法中，必须保证内燃机运转时在被测样气中存在有多余氧量，故在仪器中专门加入一定量的氧(空气)，进入 110℃保温取样管路与样气混合，并由输送泵送入 600℃左右的催化室内完全燃烧，再进入 750℃的氧化锆传感器室内，测出传感器输出的电压(单位 mV)$E_@$，其规律服从 Nemst 定律，形式为

$$E_@(750℃) = 50.6\log_{10}(C_1/C)\ mV \tag{3-16}$$

式中：C——多余氧的质量浓度；

C_1——空气中的氧的质量浓度。

氧的质量浓度 C 和过量空气系数 ϕ_a 之间的关系式为

$$\phi_a = \frac{1 + (4.76C - x)(1 + 0.302n)}{1 - 4.76C(1 + 0.25n)} \tag{3-17}$$

式中：x——加入的氧量，%；

n——燃料中的氢碳的物质的量之比。

根据内燃机中燃料完全燃烧方程式：

$$l_0 = \frac{34.57(4 + n)}{12.01 + 1.01n} \tag{3-18}$$

则空燃比(质量)可由下式计算：

$$\alpha = \phi_a \times l_0 \tag{3-19}$$

这种仪器可测瞬态的及各缸的空燃比，还可显示 ϕ_a 和 O_2 的体积分数。测量时，空燃比的精度可达±0.1α。

3.7 汽车排放污染物的检测方法

汽车内燃机的排放污染物主要包括气态污染物和颗粒物。气态污染物指氧化碳（CO、CO_2）、碳氢化合物（HC）和氮氧化物（NO_x）；颗粒物（PM）指在温度不超过 325 K（52℃）的稀释排气中，由规定的过滤介质上收集到的所有物质（包括碳粒及其吸附的可溶性有机物和硫酸盐）。随着法规的加严，对颗粒物的测量则是更加关注微粒粒径分布和数量（PN）的测试，这样可更好地分析内燃机排放微粒对环境和人体健康的实际影响。

对污染物进行测量分析的方法一般有两种：物理方法和化学方法。根据我国制定的汽车排放标准，采用物理分析方法测量 CO、CO_2、HC、NO_x，下面将对其进行简单介绍。

3.7.1 CO、CO_2 的测量

测量 CO、CO_2 时通常采用不分光红外分析仪（non-dispersive infrared analyzer，NDIR）。它是基于某些气体具有吸收某些特定波长的红外线的能力，且吸收能力与气体浓度有关这一原理进行测量的。进一步说，除单原子气体（如 Ar、Ne）和同原子的双原子气体（如 N_2、O_2、H_2 等）外，大多数非对称分子（不同原子构成的分子）都具有吸收特定波长红外线的特性。汽车内燃机排气中的有害气体均为非对称分子。这些非对称分子对特定波长红外波的吸收程度与气体浓度有关。CO 能吸收波长 4.5～5 μm 的红外线；CO_2 能吸收波长 4～4.5 μm 的红外线；CH_4 能吸收波长 2.3、3.4 和 7.6 μm 的红外线。

不分光红外分析仪的结构示意图如图 3-31 所示。从图中可看出该仪器主要由红外光源、截光盘、滤波器、参比室、检测器等组成。在参比室里充满不吸收红外线的气体（如 N_2），而被测气体则通过气样分析室。从红外光源射出的红外线，经过旋转的光栅（也称截光盘）交替地投向气样室和装有不吸收红外线的介质的参比室，然后进入检测器。检测器有两个接收室，里面都充有与被测气体成分相同的气体，中间用兼作电容器极板的金属膜片隔开。测量时，当含有待测组分的被测气体流经分析室时，两个接收室接受红外辐射能力的差别也随之显现，从而导致电容量发生变化。被测气体的浓度越大，转换成检测室电容量的变化就越大，从而得到的电信号也越大。

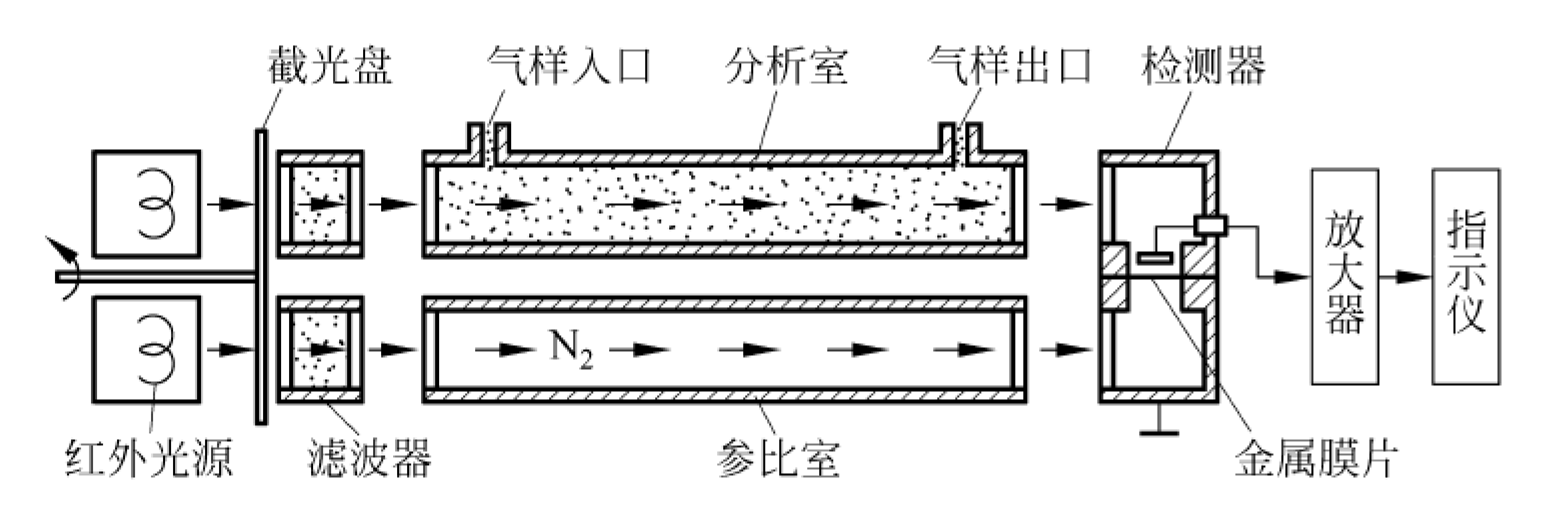


图 3-31 不分光红外分析仪（NDIR）简图

因此，经过适当标定，就可以根据输出信号的大小确定待测组分的含量。上述红外线强度的关系式遵循 Bill 定律：

$$I = I_0 \exp(-k_\lambda c l) \tag{3-20}$$

式中：I——经气体吸收后投射的红外辐射强度；

I_0——红外光源投射到被测气体的辐射强度；

k_λ——气体对波长为 λ 的红外光的吸收系数，对于某一特定成分（待测组分的种类），k_λ 为常数；

c——被测气体组分的含量；

l——红外光透过的气体厚度。

3.7.2　THC 的测量

测量 THC（总碳氢）时采用氢火焰离子化分析仪（hydrogen flame ionization detector，FID），它利用火焰导电的原理测量内燃机排气中 HC 的浓度。火焰导电的强弱和燃料种类有关。HC 的火焰产生比氢火焰高几个数量级的离子，有较强的导电性。在氢火焰离子化分析仪里，待测气体和助燃气体氢混合后进入燃烧器。在缺氧的火焰中，HC 分解出离子。HC 燃烧产生的离子在喷嘴和电极之间形成离子流，其强度与 HC 中的碳原子数目成正比。通过对离子流的测量，即可测得碳原子的浓度，即总碳氢（THC）。

根据上述原理制成的分析仪结构示意图如图 3-32 所示。

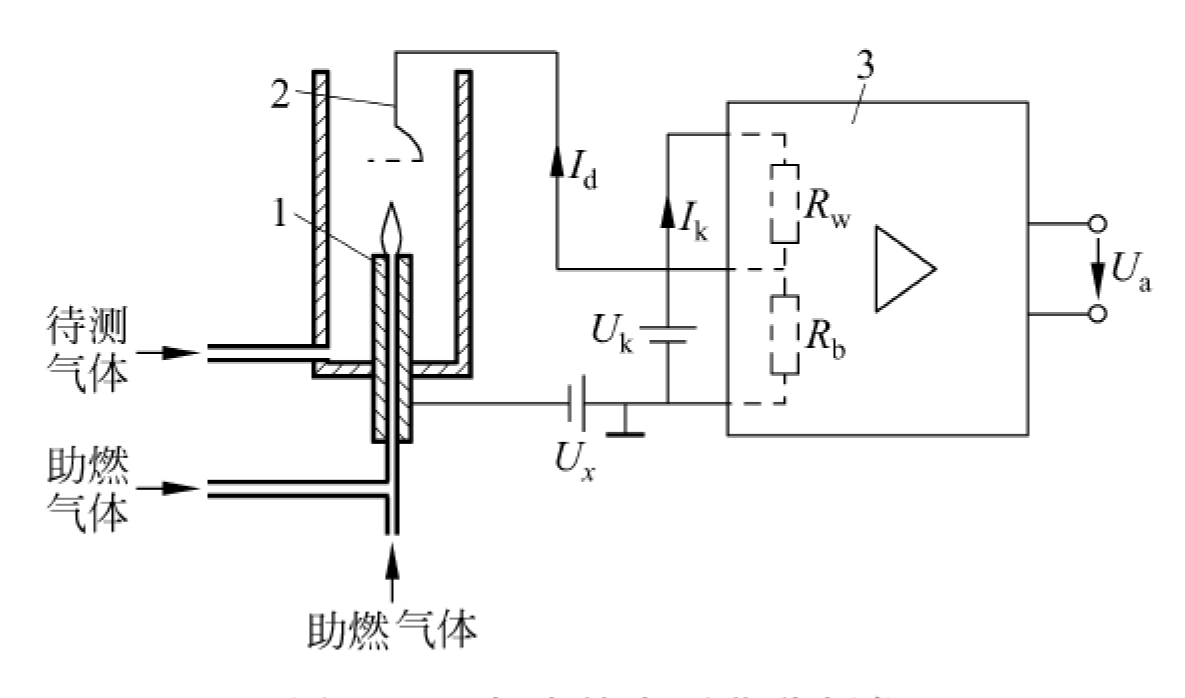


图 3-32　氢火焰离子化分析仪

1—燃烧喷嘴；2—电极；3—测量信号转换器

3.7.3　NO_x 的测量

测量 NO_x 采用的是化学发光分析仪（chemiluminescent detector，CLD），其工作原理及结构简图如图 3-33 所示。

测量 NO 的原理是基于 NO 与臭氧的反应，即

$$NO + O_3 \Longrightarrow NO_2^* + O_2 \tag{3-21}$$

$$NO_2^* \Longrightarrow NO_2 + h\nu$$

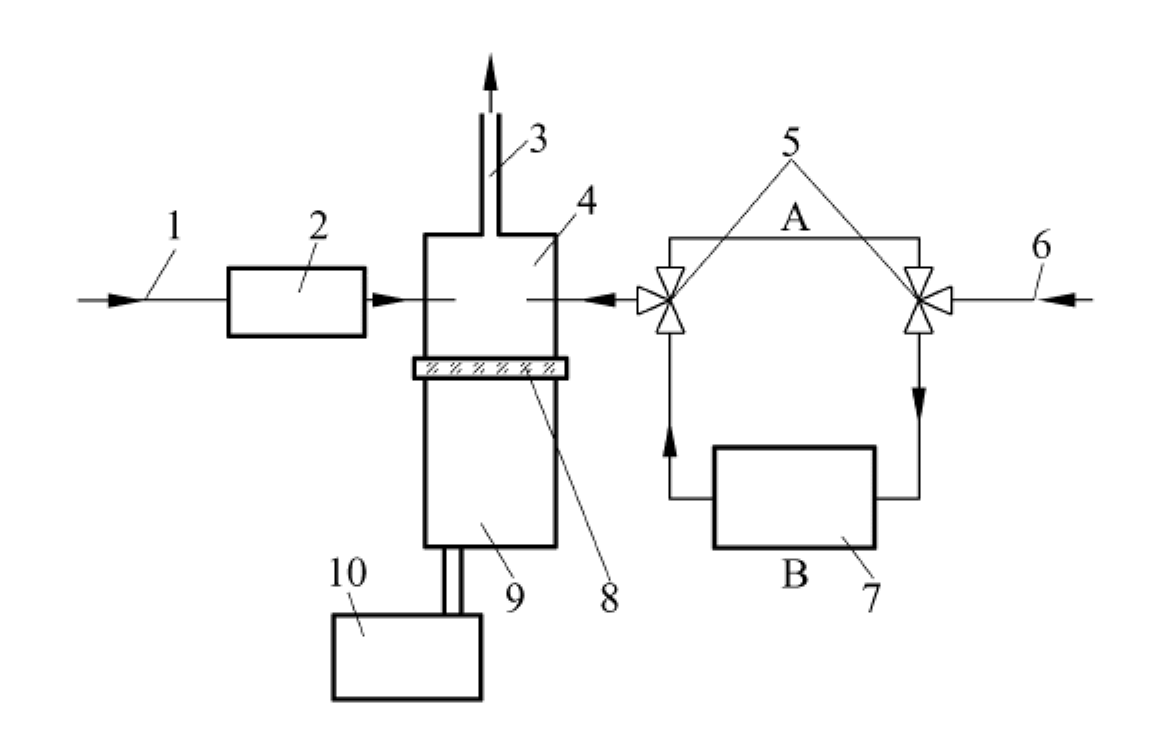


图 3-33 化学发光分析仪结构简图

1— 氧气入口；2—臭氧发生器；3—反应室出口；4—反应室；5—转换开关；6—气样入口；7—催化转换器；8—滤光片；9—检测器；10—信号放大器

式中：NO_2^* 分子在上述反应中达到激发状态，这个激发状态的能量将以化学发光的形式释出。这种光线（波长范围为 0.6～3 μm）的光子 $h\nu$（近红外谱线，其中，h 为普朗克常数；ν 为光子的频率）的强度和 NO 的浓度成正比，通过检测发光光强就可以确定被测 NO 的浓度。采用化学发光测定的被测气体含有 NO_2 时，NO_2 需要先在转换器中还原为 NO，然后进入反应室，进行上述反应过程。因此，通过该仪器测量得到的是 NO 和 NO_2 的总和即 NO_x。另外，通过该仪器也可测 NO_2。

图 3-33 中滤光片的作用是滤除或消除样品中其他组分的干扰，如 C_2H_4 与 O_3 反应所产生的化学发光光谱；由于催化转换器的效率直接影响到测量精度，为提高测量精度，催化转换器的工作温度必须保持在 650℃以上，并要经常检查其转换效率，如低于 90％时应更换催化转换器。

3.7.4 烟度和微粒测量

通常所说的微粒是指柴油机工作时排出的炭烟及其吸附物。由于非缸内直喷汽油机采用预混合燃烧方式，除了因使用高含铅量汽油而引起含铅微粒排放外，一般情况下不产生微粒；而柴油机采用压燃（扩散）燃烧方式，工作时必然会产生微粒，同样缸内直喷汽油机工作时也会产生微粒。

关于炭烟和微粒可理解为，微粒是由黑炭烟、可溶性有机物 SOF 以及包含在燃料中的硫燃烧后生成的微粒等组成的复合体；炭烟是由于过浓混合气在高温缺氧下不完全燃烧而生成的，是微粒的主要组成部分，内燃机高负荷时所占比例很大。由此可见，在对柴油机排放进行的测试中，虽然微粒和烟度（即炭烟量）的测量是两个不同的测量指标，但两者有着密切的关系。

微粒测量与烟度测量相比，微粒测量所用的设备复杂，价格昂贵，测量烦琐，因而不易普及。目前，微粒测量主要用于排放法规检测试验，而烟度测量则被广泛应用。

1. 柴油机排气微粒测量系统

该测量系统包括稀释和取样系统、滤纸、称重室及精密天平。

微粒测量稀释和取样系统可采用全流稀释或分流稀释取样系统(该系统在第 6 章有详细介绍)。所谓全流稀释就是将全部排气引入稀释风道里,这种系统是权威认证的基准,测量精度高,但体积大、价格昂贵。分流稀释是将部分排气引入稀释风道里,优点是投资少、体积小,目前被广泛应用。

2. 烟度的测量方法

烟度的测量方法主要有两类：一类是利用烟气对光的吸收作用,通过测量光从烟气中的透过度来确定烟度,这种方法叫做透光度法。另一类是先用滤纸收集一定量的炭烟粒子,再通过滤纸表面对光的反射率的变化来测量烟度,这种方法叫做滤纸法,也称反射法。相应的测量仪器分别被称为透光式烟度计和滤纸式烟度计。

相应的测试标准有：GB 3847—2005《车用压燃式内燃机和压燃式内燃机汽车排气烟度排放限值及测量方法》；GB 17691—2005《车用压燃式、气体燃料点燃式内燃机与汽车排气污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ阶段)》。

1）滤纸式烟度计

滤纸式烟度计主要由定容采样泵和检测仪两部分组成。采样抽气泵从排气中抽取一定容积的样气,样气通过滤纸时,使气样的炭烟沉积在滤纸上。由于抽取的气样数量恒定,因此滤纸被染黑的程度可反映气样中所含炭烟的浓度。与微粒质量测量方法不同,滤纸式烟度计不是测量滤纸的质量,而是测量滤纸的黑度对光线的反射程度。

图 3-34 为滤纸式烟度计(波许(Bosch)烟度计)工作原理图。当光源的光线射向已取样的滤纸时,一部分光线被滤纸上的炭烟所吸收,另一部分被反射给光电元件,从而产生相应的光电流,并由指示器指示输出。光电流的大小反映了滤纸反射率的大小,而滤纸反射率取决于滤纸被染黑的程度。光电流越小,滤纸的反射率越低,即滤纸的染黑程度越高,表明被测炭烟的浓度越高。

常用的滤纸式烟度计为波许烟度计。波许烟度计的测量结果称为波许烟度。波许烟度的数值为 0～10,0 为无污染的滤纸的黑度,10 为全黑滤纸的黑度。

为保证滤纸式烟度计读数稳定,一要光源稳定；二要滤纸规格统一。

滤纸式烟度计结构简单,使用方便,曾获得广泛的应用。但这种烟度计不能测定由油雾造成的蓝烟与白烟,也不能对瞬态工况进行连续的测量。由于柴油机微粒中各种成分对光线的吸收能力不同,不同柴油机在不同工况下测得的滤纸烟度值与微粒质量之间没有完全的一一对应关系。

2）透光式(消光式)烟度计

透光式烟度计是把光照向部分或全部排气,设在光源对面的感光元件将所接收到的光强度转换成电信号,以显示测量结果。比较典型的仪器是哈特里奇(Hartridge)烟度计,图 3-35 是其测量原理图。这种烟度计除烟度显示部分外,其检测部分主要由校正装置、光

源与光电检测单元(光电池等)组成。烟度的分度方法是:0 为无烟,通常用干净空气的透明度标定;100 为全黑,透光度为 0。

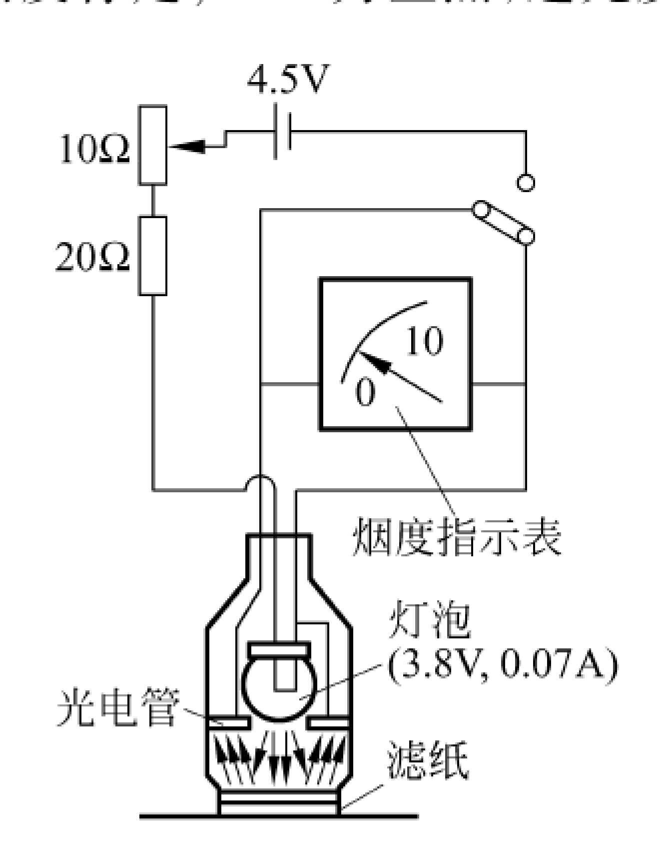


图 3-34 波许烟度计工作原理示意图

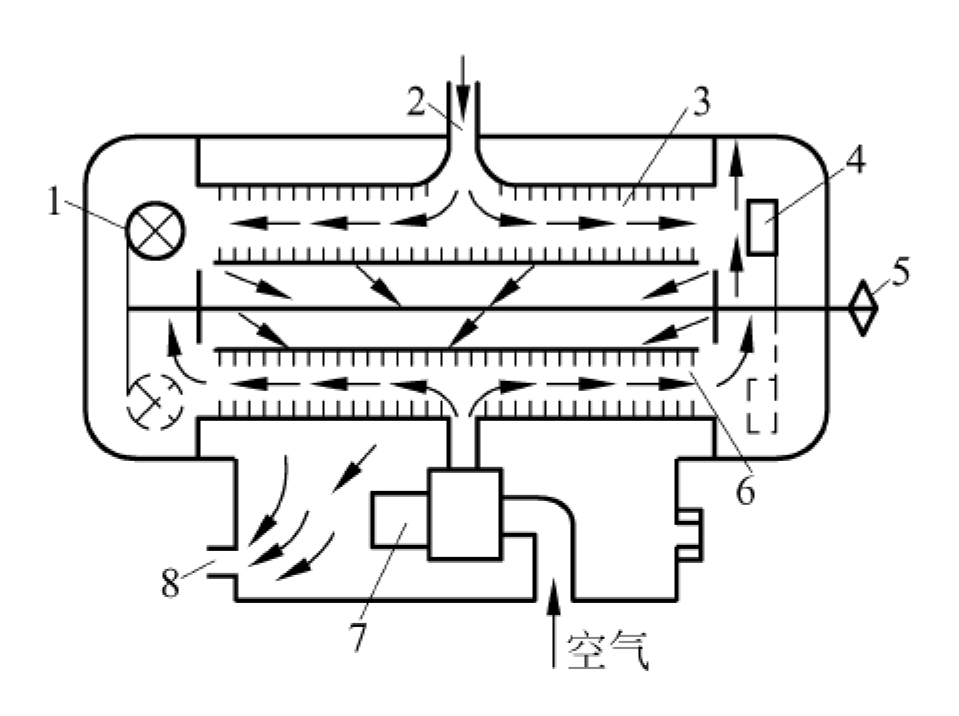


图 3-35 哈特里奇烟度计测量原理图

1—光源;2—排气入口;3—排气测试管;4—光电池;5—转换手柄;6—空气校正器;7—鼓风机;8—排气出口

测量前将转换手柄转向校正位置(光源 1 和光电池 4 位于图中虚线位置),这时光源和光电检测单元分别位于校正管的两端,接着用鼓风机将干净的空气引入校正管,对烟度计进行零点校正,然后将手柄转向测量位置(此时光源 1 和光电池 4 位于图中实线位置),使光源和光电检测单元分别位于测量管两端,接通被测排放气体导入管,让被测气体连续不断地流经测量管,此时光源发出的光部分地被排气中的微粒(主要是微粒中的炭烟)所吸收,光电检测单元所测得的光线是被削弱了的光线,反映了排放气体对光源发射光的透光度(或衰减率),通过记录仪表显示,可观察到排放烟度随时间的变化情况。

通常,透光法测得的不透光度(即烟度)N 用百分比表示。在国家标准 GB 17691—2005《车用压燃式、气体燃料点燃式内燃机与汽车排气污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ阶段)》中规定:试验循环的烟度值应以光吸收系数读数方式测量,单位为 m^{-1}。

光吸收系数 k 与不透光度之间的关系如下式所示:

$$\begin{cases} k = -\dfrac{1}{L_a} \times \ln\left(1 - \dfrac{N}{100}\right) \\ N = 100 - \tau \end{cases} \tag{3-22}$$

式中:k——光吸收系数,m^{-1};

L_a——光通道有效长度,由仪器制造厂提供;

N——不透光度,%;

τ——烟的透光度,%。

消光式烟度计不仅可测黑烟,也可测蓝烟和白烟。汽车在冷起动时会出现白烟,串机油时会出现蓝烟。并且它对低浓度的可见污染物具有较高的分辨率,可以进行连续测量。因

此，它不仅可用来研究柴油机的瞬态炭烟和其他可见污染物（黑烟、白烟和蓝烟）的排放性能，而且可以方便地测量排放法规中所要求的自由加速烟度和有负荷加速烟度。

3.8　性能参数的测量精度及标准

为保证测量结果的可靠性，保证各测量参数的测试精度是非常重要的。国家标准对此有严格的规定。国标 GB/T 18297—2001《汽车发动机性能试验方法》中对仪表精度及测量参数均有严格的要求，如：

（1）扭矩：误差不超过所测内燃机最大扭矩值的±1%。

（2）转速：误差不超过所测值的±0.5%。

（3）燃油消耗量：误差不超过所测值的±1%。

（4）温度分不同情况有不同要求。

① 冷却液温度：在靠近内燃机冷却液出口及入口两处测量；误差不超过±2K。

② 机油温度：在主油道、主油道的入口或有代表性部位测量；误差不超过±2K。

③ 排气温度：传感器端头离内燃机排气歧管出口或涡轮增压器出口 50 mm 处测量，并位于排气连接管的中心，传感器逆气流方向插入；误差不超过±15K。

④ 燃油温度：柴油温度在燃油喷射泵进口处测量；汽油温度在靠近化油器或喷油器的入口处测量。若有困难，可按制造厂推荐的有代表性的部位。误差不超过±2K。

对上述各种参数的测量，试验人员应能对测量精度进行分析，了解测量值的真实性。测量精度的分析，即误差分析，在工科院校物理学等课程中已作过详细讲述，本书不另作讲解。直接测量的参数的误差，如转速、温度、测功机读数的误差，与测量装置、传感器、仪表、显示方式（或人工读数方法）等都有密切关系，本书前述章节中已作了必要的介绍。若要详细计算和了解，须参考相关专著。间接测量参数，如功率、燃油消耗率等，有专门的计算公式，其误差要根据误差分析原理由各公式中的直接测量参数的误差来确定。比如，按式（3-7）求取内燃机燃油消耗率时，需要先测量 3 个参数值，即内燃机转速、内燃机扭矩、燃油消耗量，前二参数可算出内燃机功率，而燃油消耗量又是通过测量时间、燃油体积或质量获得，因此燃油消耗率的精度至少受 4 个因素的影响，故其精度要比这 4 个参数的精度低。

为保证测量精度的要求，在进行试验前需对各测试仪器和设备进行标定，关于标定方法在各仪器和设备说明书中均有详细的说明。如为保证内燃机扭矩的测量精度，试验前需对测功机扭矩零点、满度、量程进行标定，标定方法按说明书步骤进行。本书也作了一些必要介绍。

对一些专项研究开发试验，各参数的测量精度要求要比一般性能试验要求要高。如在进行内燃机热平衡试验时，冷却液温度、油温、排气温度测量精度要高于本节中的①～③所列。因此，读者在进行试验开发研究过程中需特别关注。

参 考 文 献

[1] 姜立标.汽车传感器及其应用[M].2版.北京：电子工业出版社，2013.
[2] 行文凯.汽车内燃机控制系统及诊断维修[M].北京：化学工业出版社，2007.
[3] 王尚勇，杨青.柴油机电子控制技术[M].北京：机械工业出版社，2005.
[4] 李建秋，赵六奇，韩晓东，等.汽车电子学教程[M].2版.北京：清华大学出版社，2011.
[5] 王登泉，杨明，叶林，等.非接触式旋转轴扭矩测量现状[J].电子测量技术，2010，33(6)：8-12.
[6] 宋春华，徐光卫.扭矩传感器的发展研究综述[J].微特电机，2012(11)：58-60.
[7] 王金力，杨福源，欧阳明高，等.关于缸压传感器替代内燃机凸轮轴和曲轴位置传感器的研究[J].汽车工程，2014(12)：1455-1460.
[8] NILSSON Y，ERIKSSON L. Determining TDC Position Using Symmetry and Other Methods[C]. SAE Technical paper，2004-01-1458.
[9] PIPITONE E，BECCARI A，BECCARI S. Reliable TDC position determination：a comparison of different thermodynamic methods through experimental data and simulations[C]. SAE Technical paper，2008-36-0059.
[10] 严兆大.热能与动力工程测试技术[M].2版.北京：机械工业出版社，2006.
[11] 历彦忠，吴筱敏.热能与动力机械测试技术[M].西安：西安交通大学出版社，2007.
[12] 安相璧，唐天元.汽车试验工程[M].北京：国防工业出版社，2006.
[13] 唐岚.汽车测试技术[M].北京：机械工业出版社，2006.
[14] 陈龙.内燃机微粒排放物测试方法分析[J].城市车辆，2007(8)：45-47.
[15] 方茂车，郑贺悦.基于碳平衡法的汽车油耗测量方法[J].汽车工程.2003(3)：294-297.

第4章 内燃机性能试验

4.1 概　　述

车用内燃机的转速和负荷经常变化，因而输出功率也经常变化。在载客量或载荷质量不变的情况下，由于路面、行人和交通等情况不同，汽车行驶速度会有快有慢，因而需要内燃机转速能高能低；且在同一车速下，载客量和载荷质量也可以有多有少，路面情况也会不同，内燃机负荷也就有大有小。因此，根据整车动力的需求，车用内燃机的运行状况经常在不断地变化着。

内燃机工况就是内燃机运行或工作的状况。负荷和转速是内燃机运转过程中确定工况的两个主要运行参数。在整车速比确定的情况下，内燃机转速与汽车速度成正比。而负荷可由有效输出扭矩或平均有效压力来表示，与汽车运行时的总阻力成正比。

因此，要了解汽车在各种工况下的性能和变化规律以及在某一工况下运行的可能性和适应性，就必须研究内燃机的性能随工况变化的规律。

内燃机的性能主要指动力性能、经济性、排放性、可靠性和耐久性。根据内燃机运行工况的不同，内燃机的性能可分为稳态性能和动态性能。内燃机的稳态性能对应内燃机的稳定运行，此时内燃机循环平均的性能指标、工作过程参数不随时间变化。汽车的匀速行驶、内燃机台架试验中的稳定运行就属于这种工况。内燃机的动态性能是指内燃机在过渡过程或不稳定工作过程中的特性。汽车加速、减速、起动等工况或内燃机从一个稳定工况过渡到另一个稳定工况时，过渡过程工况就是动态性能研究的对象。本章重点介绍内燃机稳态的一般性能试验，内燃机动态性能试验将在第8章介绍。目前，排放性能、可靠性和耐久性已成为影响内燃机发展的一个重要方面，它们的试验测试方法与一般性能试验有较大差异，将分别在第5章、第6章中介绍。

内燃机性能试验的内容包括一般性能试验、性能匹配调整试验和研究性试验。而内燃机一般性能试验如何组织和进行，即试验目的、试验条件、试验方法、测量项目及数据整理等，国家标准GB/T 18297—2001《汽车发动机性能试验方法》中都有详细说明。

GB/T 18297—2001 中规定了 10 项内燃机一般性能试验的内容和试验方法：①功率试验；②负荷特性试验；③万有特性试验；④机械损失功率试验；⑤起动试验；⑥怠速试验；⑦压燃机调速特性试验；⑧各缸工作均匀性试验；⑨机油消耗量试验；⑩活塞漏气量试验。

本章重点介绍前 6 种性能试验方法。

4.2 内燃机功率试验

速度特性是内燃机油门开度不变时，内燃机性能指标和特性参数随转速变化的规律。功率试验，也称外特性试验，就是内燃机油门全开时与动力、经济性有关的速度特性试验。它是在内燃机油门开度 100％的位置时，内燃机动力、经济性能指标（M_e、G_f、g_e、P_e、T_e等）随转速而变化的特性试验。

内燃机功率试验的目的，首先是评价内燃机在额定工况下的动力性、经济性和排放性指标，包括额定功率、扭矩、油耗率等；其次是确定其他工况下的最大动力性能指标，包括整机的最大扭矩、最大转速与最大功率值；此外还可了解外特性段的有害排放情况。

功率试验分为总功率试验和净功率试验。它们的区别在于内燃机工作所驱动的附件不同（见 ISO 1585—1992《道路车辆 发动机净功率试验》、ISO 2534—1998《道路车辆 发动机总功率试验》、GB/T 18297—2001《汽车发动机性能试验方法》）。总功率试验时，发动机仅带有能保证其工作的附件，如曲轴箱通风装置、发电机、调压器及蓄电池、内燃机电控系统等，没有这些附件内燃机就不能工作。它表示内燃机运转时能达到的最大动力性能指标。

净功率试验时，内燃机应安装整车运行时所需配备的各种附件，而且这些附件应该是原生产装备件，安装位置应尽可能地与实际安装情况相同。它表示内燃机装在汽车上运转时，曲轴端能输出的最大有效性能指标。随着汽车排放法规日趋严格，为了使真实运行时的排放性、动力性和经济性达到最佳匹配，匹配调整试验必须在净功率试验状态下进行，所以现代车用内燃机的动力性能指标常用净功率指标来表示。

4.2.1 试验内容及测试项目

在进行功率试验时，内燃机油门开到最大位置，即油门开度设定到 100％位置，在内燃机工作转速范围内，依次地改变转速进行测量，适当地选择不少于 8 个点的稳定工况点（有些试验，因试验目的要求，为能获得更加准确的曲线，试验点会选得更多，如每 100 转有一测量点），其中必须包括额定点和最大扭矩点。测量各稳定工况点的转速、扭矩、油耗量，并计算功率和燃料消耗率等。绘制出如图 4-1 所示的性能曲线图。

需要指出的是，对同一机型，如果用途不同，标定目标会不同，就会通过一定的技术手段使得内燃机外特性曲线形状、额定功率、额定转速等参数都不同。例如当内燃机作为赛车动

力时，最关注的是短时间内燃机所能发出的最大功率和最大扭矩，故它标定的最大功率、最大扭矩就要大于当它作为轿车动力时的最大功率、最大扭矩。轿车用内燃机使用时的负荷率一般都较低，动力性能有所保证，所以更关注高可靠性、高经济性和低排放性。可见，额定工况的指标是根据内燃机应用场所不同人为标定的结果，与内燃机最大可能的性能指标是有区别的。

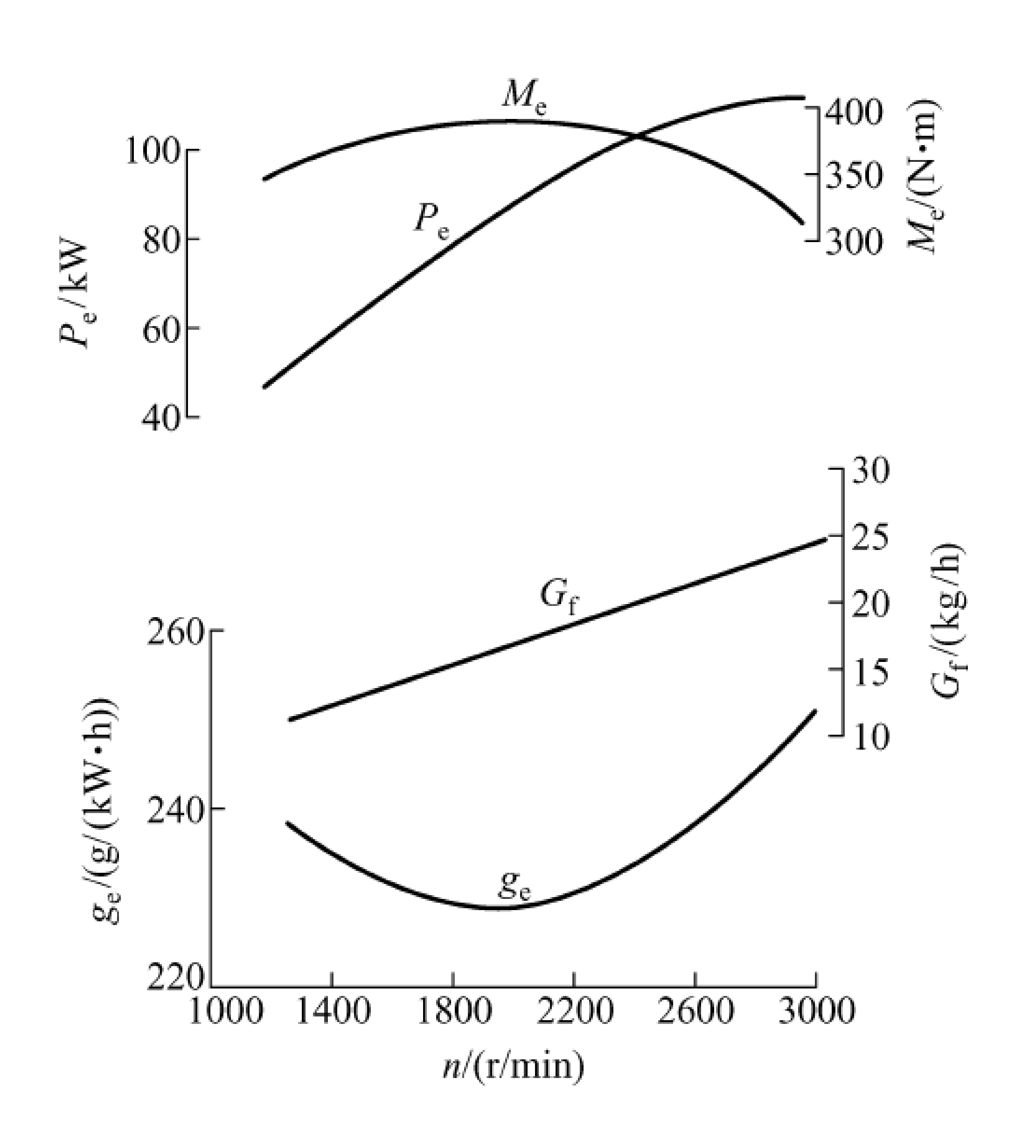


图 4-1　某内燃机功率试验性能曲线

试验所需测量的主要项目有以下几个。

（1）转速、扭矩。内燃机功率试验中可直接测量内燃机的扭矩和转速，通过转速和扭矩再计算出功率。扭矩、转速和功率决定了内燃机的动力性能，从而决定了汽车动力性三要素——车速、爬坡能力和加速能力的最重要的参数。

（2）燃料消耗量。为了解内燃机在全负荷工况下的经济性，需测量内燃机燃料消耗量，再由此计算出外特性各工况的燃油消耗率。

（3）排放污染物。对于排放污染物限值及测量方法，可参考国家标准 GB 17691—2005《车用压燃式、气体燃料发动式内燃机与汽车排气污染物排放限值及测量方法（中国Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ阶段）》进行。此外，测试排放污染物是为了了解外特性段的排放情况，而不是按排放法规进行达标和认证试验。有关排放测试技术及方法，详见第 6 章。

（4）排气温度、点火或喷油提前角、水温、润滑油温、油压以及燃油温度和燃油牌号等。测量目的是保证内燃机试验工况处于最佳调整和正常工作状态。

（5）进气状态。进气状态主要包括大气温度、湿度、大气压力，测量目的是为了计算获得校正有效功率及压燃机的燃油消耗率（根据标准 GB/T 18297—2001，压燃机在全负荷的燃油消耗率应校正），以便进行对比分析。

4.2.2　大气校正

为使试验数据具有可比性，各国都制定了内燃机性能试验标准，严格地规定了试验条件和标准大气状态。现在各国的试验标准都向国际标准（ISO）靠拢。从 20 世纪 90 年代开始，美国、日本的标准都与 ISO 标准状况基本一致，欧洲各国则均向 ECE R85 靠拢。

如果进行功率试验时不能在标准状态的实验室内进行，就必须将非标准大气状况下所测得的功率和燃油消耗率换算成标准大气状况下的数值，以便内燃机之间进行比较、评价和配套。这种换算就称为大气校正。内燃机标准进气状态见表 4-1。

有关详细校正的计算公式可参考国家标准 GB/T 18297—2001《汽车发动机性能试验方法》。这里仅以内燃机功率修正为例进行说明。

表 4-1 内燃机标准进气状态

进 气 参 数	单 位	标 准 值
进气温度 T	K	298
进气干空气压 p_d	kPa	99
水蒸气分压 p_w	kPa	1
进气总压 p	kPa	100

内燃机功率修正计算公式：

$$\text{点燃机}\ P_{eo} = \alpha_a P_e \tag{4-1}$$

$$\text{压燃机}\ P_{eo} = \alpha_d P_e \tag{4-2}$$

式中：P_{eo}——校正有效功率，kW；

P_e——实测有效功率，kW；

α_a——空燃比不变的化油器式、电控式点燃机功率校正系数，该校正系数 α_a 应在 0.93～1.07 的范围内，如果超出，应在试验报告及试验曲线上注明实际进气状态，α_a 的计算公式为

$$\alpha_a = \left(\frac{99}{p_d}\right)^{1.2}\left(\frac{T}{298}\right)^{0.6} \tag{4-3}$$

α_d——循环供油量确定不变的压燃机功率校正系数，计算公式为

$$\alpha_d = (f_a)^{f_m} \tag{4-4}$$

上两式中，T——进气温度，K；

p_d——进气干空气压，kPa，其计算公式为

$$p_d = p - p_w$$

p——进气总压，kPa；

p_w——水蒸气分压，kPa。

应注意：在全负荷的工况下，进气温度 T 在 298～308 K 的范围内，进气干空气压 p_d 在 80～110 kPa 的范围内。

f_a 为进气因素，分以下三种情况：

(1) 对于非增压及机械增压压燃机，有

$$f_a = \left(\frac{99}{p_d}\right)\left(\frac{T}{298}\right)^{0.7} \tag{4-5}$$

(2) 对于涡轮增压带或不带空/空中冷器时，有

$$f_a = \left(\frac{99}{p_d}\right)^{0.7}\left(\frac{T}{298}\right)^{1.5} \tag{4-6}$$

(3) 对于涡轮增压带水/空中冷器时，有

$$f_a = \left(\frac{99}{p_d}\right)\left(\frac{T}{298}\right)^{0.7} \tag{4-7}$$

f_m 为压燃机特性指数，计算公式为

$$f_m = 0.036\,\frac{q}{r} - 1.14 \tag{4-8}$$

式中：q——比排量循环供油量，毫克/L・循环(mg/L・cyc)；

r——增压比。

有效功率的换算是一个比较复杂的问题。目前世界各国关于功率校正的公式尚不统一，而是根据各国的具体条件来确定的。在其有关的试验标准中，均有相应的规定。各种校正方法都有一定的前提和假设条件，适用范围也有一定的局限性。

因此，人们在内燃机试验研究过程中，为有效地比较不同内燃机性能，通常的办法有：①将进气系统做成标准进气状态；②不同种机型试验的时间都安排在试验环境接近时，如规定试验均在早上进行等，这样可减小试验结果误差。有关内燃机速度特性试验的具体试验方法、试验条件等详见附录 A 中试验 1、3。

4.2.3　功率特性试验的应用

功率特性试验可以直接反映该内燃机产品所具有的最大动力性能，是汽车及内燃机生产中以及产品检验、维修时最常用的试验方法。

功率特性试验也可用于进行内燃机产品在使用不同牌号燃油、不同调节参数、不同使用条件下的对比研究。例如，为了研究不同辛烷值对汽油机动力性能的影响，可采用功率特性的试验方法。图 4-2 所示的是分析内燃机使用三种不同辛烷值汽油时内燃机外特性中的动力性表现。从图中可以发现，在 4000 r/min 转速以下，97# 汽油的动力性要明显好于 93# 和 90# 两种标号汽油。还可进一步比较其经济性和排放性。

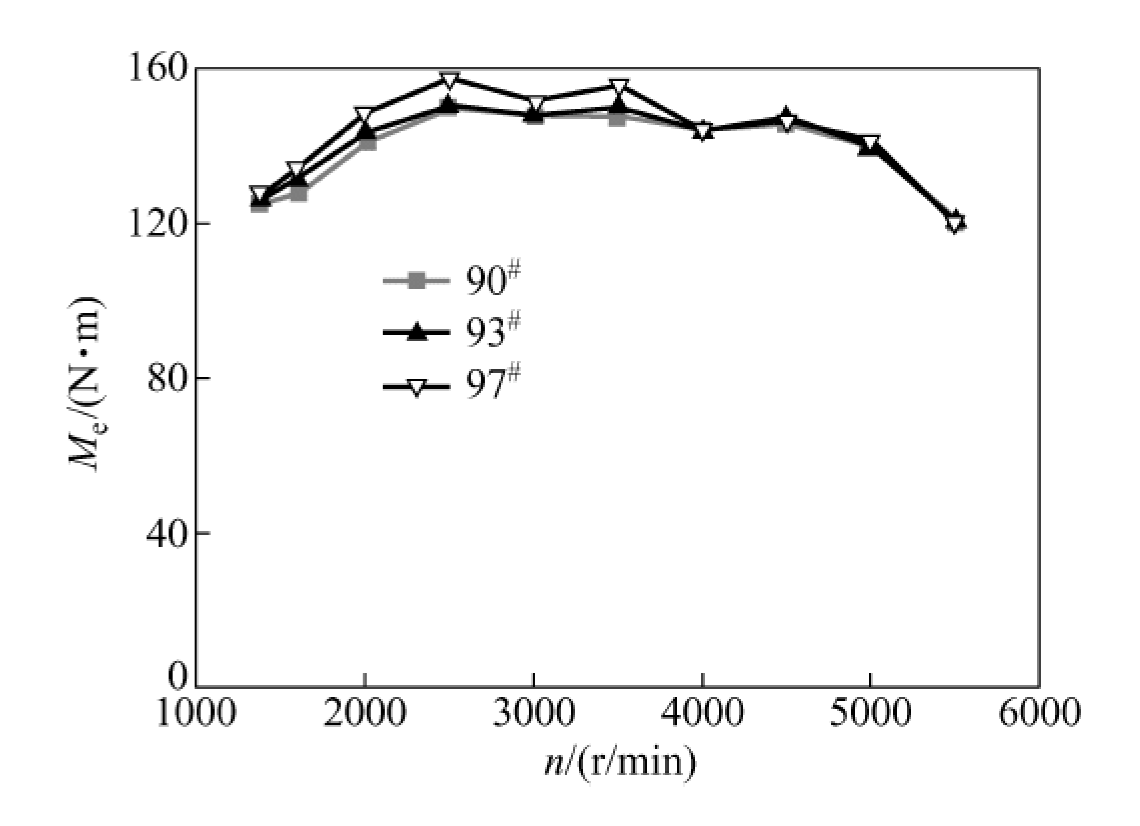


图 4-2　使用不同辛烷值汽油的内燃机外特性曲线

在产品开发或研究过程中，有时要了解内燃机外特性曲线的具体形状。此时不宜使用较少试验点的曲线拟合方法进行分析。实际内燃机中，由于进气管中动态效应（压力波）的作用，外特性曲线往往是波动的，用标准函数拟合成的平滑曲线反而是失真的。

最后要指出，功率特性试验只是速度特性中的外特性试验，还有油门开度小于100%的部分速度特性试验，如油门开度为15%、25%、45%等时的速度特性试验。其试验方法与外特性试验相同。

4.3 负荷性能试验

1. 负荷特性及其作用

负荷特性是在内燃机转速保持不变的条件下，内燃机主要性能参数（G_f、g_e 等）随内燃机负荷（功率、平均有效压力或油门开度）的改变而变化的关系。

负荷特性试验的目的是评定内燃机在规定转速、不同负荷时的经济性和排放性能。它主要表明在同一转速下，各种不同负荷时的燃油消耗率 g_e 随功率 P_e 变化的关系。对于额定转速，可以通过负荷特性曲线找出内燃机所能达到的额定功率和额定点的耗油率，判断功率标定的合理性。对于其他转速，可以通过负荷特性曲线找到内燃机各工况中的最低耗油率 g_{emin}，这是评价不同内燃机经济性能的一个重要指标。

2. 负荷特性的试验方法

内燃机起动后，稍加负荷，使内燃机逐步达到规定的稳定热状态（内燃机冷却液的出口温度（361±5）K，机油温度（368±5）K），再开始试验。一般试验在内燃机50%～80%的额定转速（其中应含常用转速和2000 r/min）下进行，需要时，转速范围可上、下扩展，直至其额定转速。试验从小负荷开始，逐步开大油门进行测量，直至油门全开为止，也可以从大负荷开始，逐渐降低至小负荷。但转速始终保持不变。应适当分布8个以上的测量点，测量点应包括转速为2000 r/min，平均有效压力为200 kPa的工况点。图4-3表示的是某汽油机在2800 r/min时的负荷特性曲线图。

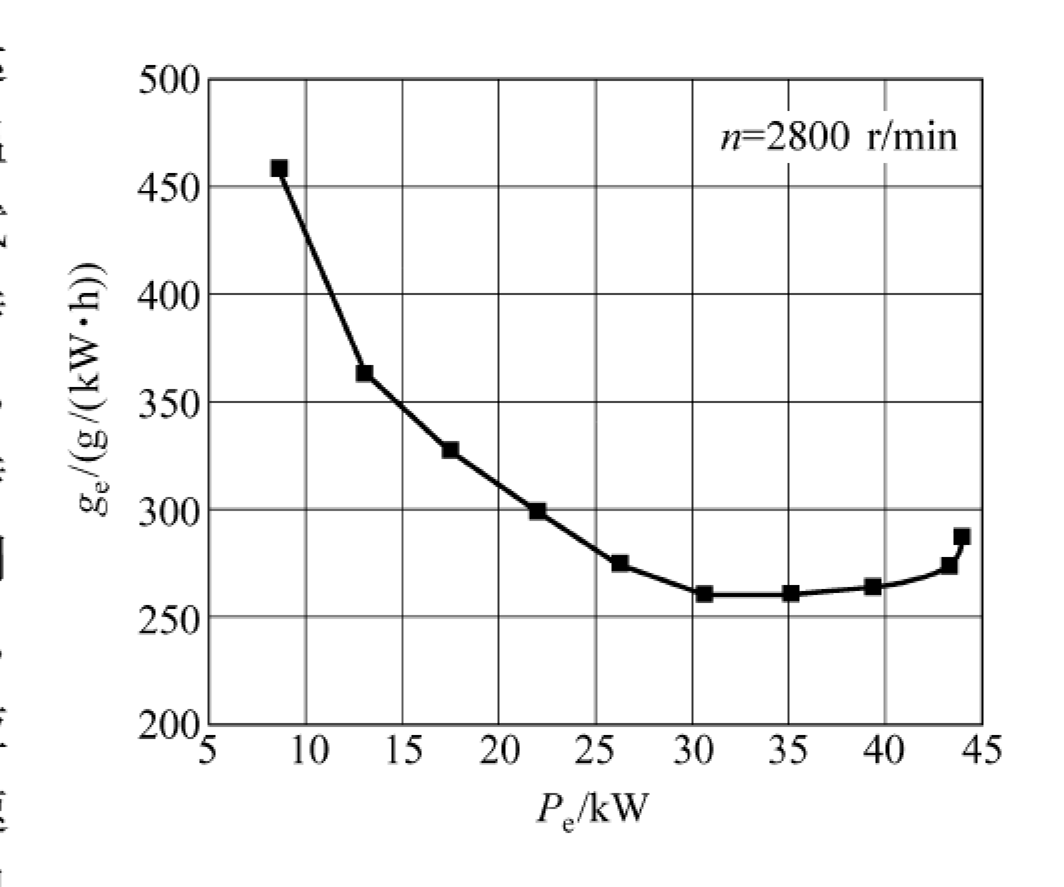


图4-3 负荷特性曲线

在进行内燃机负荷试验时，试验工况点是从小负荷开始逐渐加大负荷，还是从大负荷即油门全开逐渐降低负荷，主要取决于当时试验对象的状态及试验工程师的意图，有时人们为提高负荷特性曲线精度，试验从小负荷开始，然后逐渐加大负荷直至最大，接着逐渐降低负

荷到小负荷,完成负荷特性试验。

3. 测量参数

在对内燃机进行负荷特性试验时,测量参数的数量和方法与功率试验的测量参数基本相同,即在每一个工况下,测量内燃机进气状态、转速、扭矩、燃油消耗量、燃油消耗率、点火或喷油提前角、空燃比和排温,记录燃料牌号等。按需要测量 CO、HC、NO_x 排放量等。

4. 负荷特性曲线图及其应用

负荷特性曲线的横坐标可以是有效功率 P_e、平均有效压力 p_e 或者油门开度(%)。多个转速的负荷特性曲线画在同一张坐标图上时(见图 4-4(a)),以功率 P_e 为横坐标,则各条曲线按转速由低到高的顺序从左到右分开,这样分析、观察比较方便。若以平均有效压力 p_e 或油门开度(%)为横坐标时(图 4-4(b)),则各曲线处于同一区段,上下略有差别。后一种曲线族图,便于万有特性曲线图的制取(转速,横坐标-平均有效压力,纵坐标),也便于比较各转速负荷特性曲线的差异。

关于内燃机负荷特性的试验方法、分析方法等详见附录 A 试验 2、3。

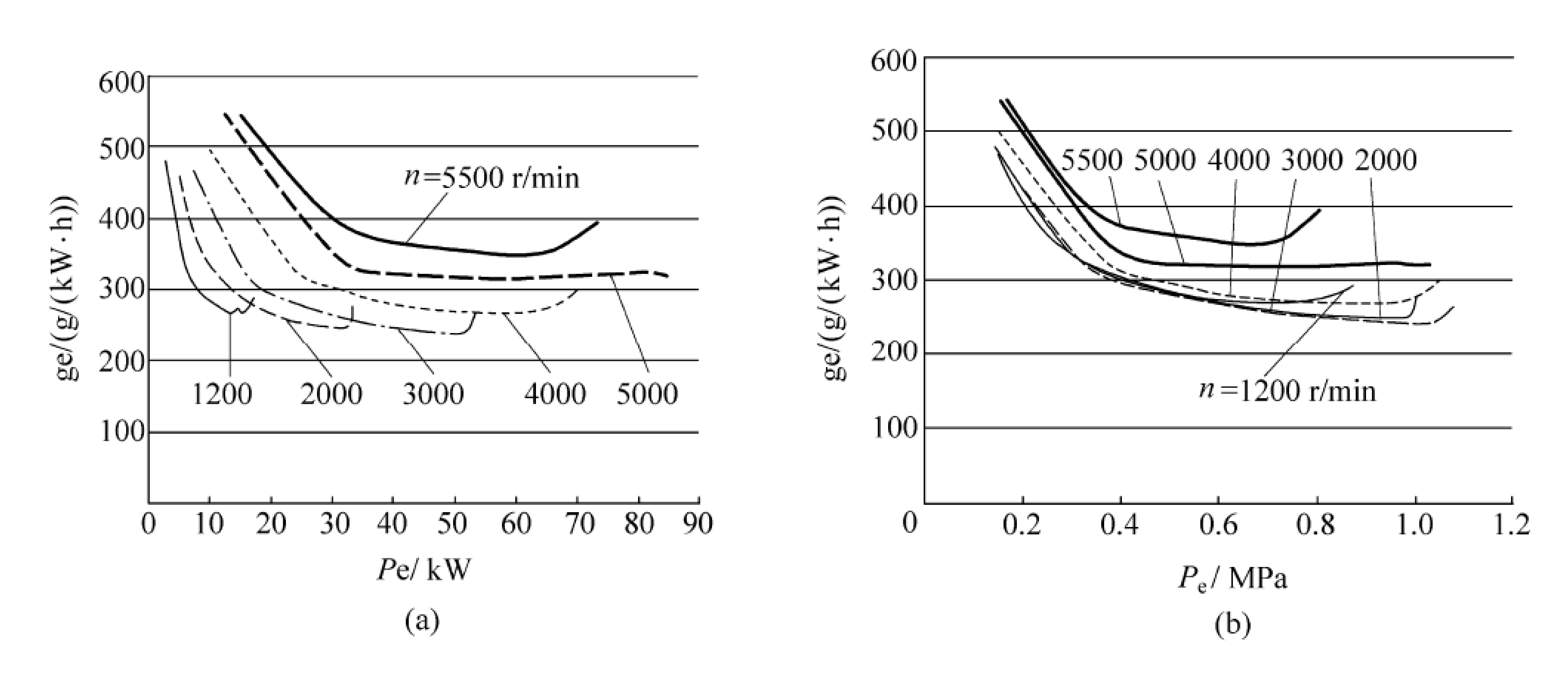


图 4-4　内燃机负荷特性曲线

(a) 油耗-功率曲线;(b) 油耗-平均有效压力曲线

4.4　万有特性试验

4.4.1　万有特性及其作用

内燃机负荷特性和速度特性分别反映了内燃机主要性能参数仅随负荷和转速变化的规律,从而可以从不同的角度评价内燃机的性能。汽车内燃机在实际工作中,转速、负荷都在不断地变化,要全面评价内燃机的性能,仅凭负荷特性或速度特性则有一定的局限性,因此

需要一种能同时展示上述两种特性的图形来进行评价。这种图形可以是在三维坐标图上，以工况面(转速和负荷的二维平面)为自变量域的特性曲面；也可以在工况面的二维坐标图上，表示为各种参数的等值线，如等燃油消耗率线、等功率线、等 NO_x 排放线等。后者就是万有特性曲线图，如图 4-5 所示。

万有特性曲线实质是所有负荷特性和速度特性线的合成。它可以表示内燃机在整个工况范围内主要参数的变化关系，用它可以确定内燃机最经济的工作区域，当然也可以确定某一排放污染物的最小值区域，等等。在内燃机性能匹配优化过程中，通过对调整参数如点火提前角、喷油提前角、喷油脉宽、EGR 率、配气相位等进行优选，可以使内燃机的最低油耗区和排放区域落在最常用的工况范围内，这是内燃机性能匹配的重要原则之一。

从使用的角度看，在产品内燃机万有特性曲线图上可以看出，全工况范围内，即各种负荷和各种转速时，平均有效压力 p_e、功率 P_e、耗油率 g_e 及有害物排放等参数的变化规律，从而能够全面确定内燃机最合理的调整和最有利的使用范围，这对汽车底盘参数的选择和设

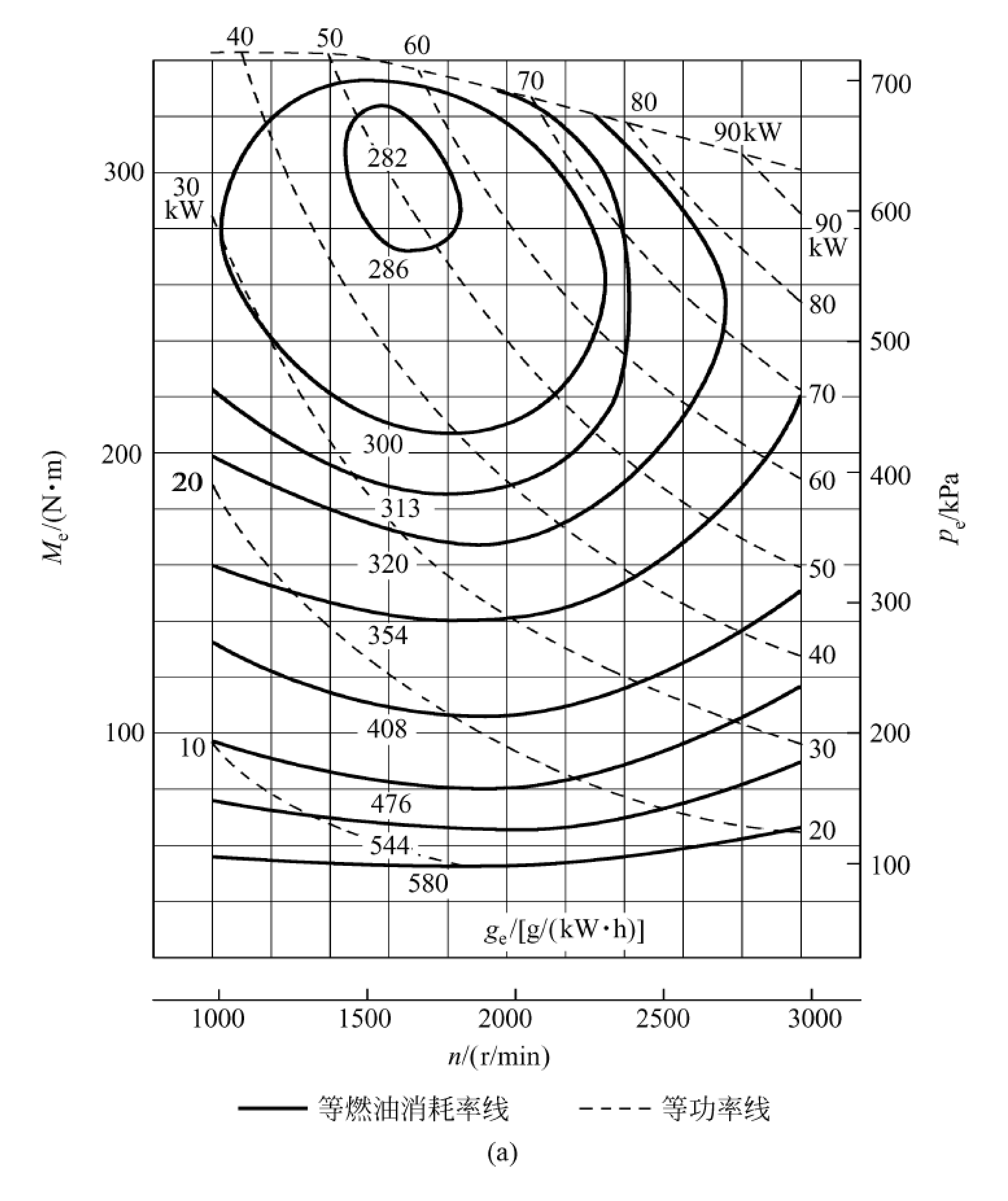
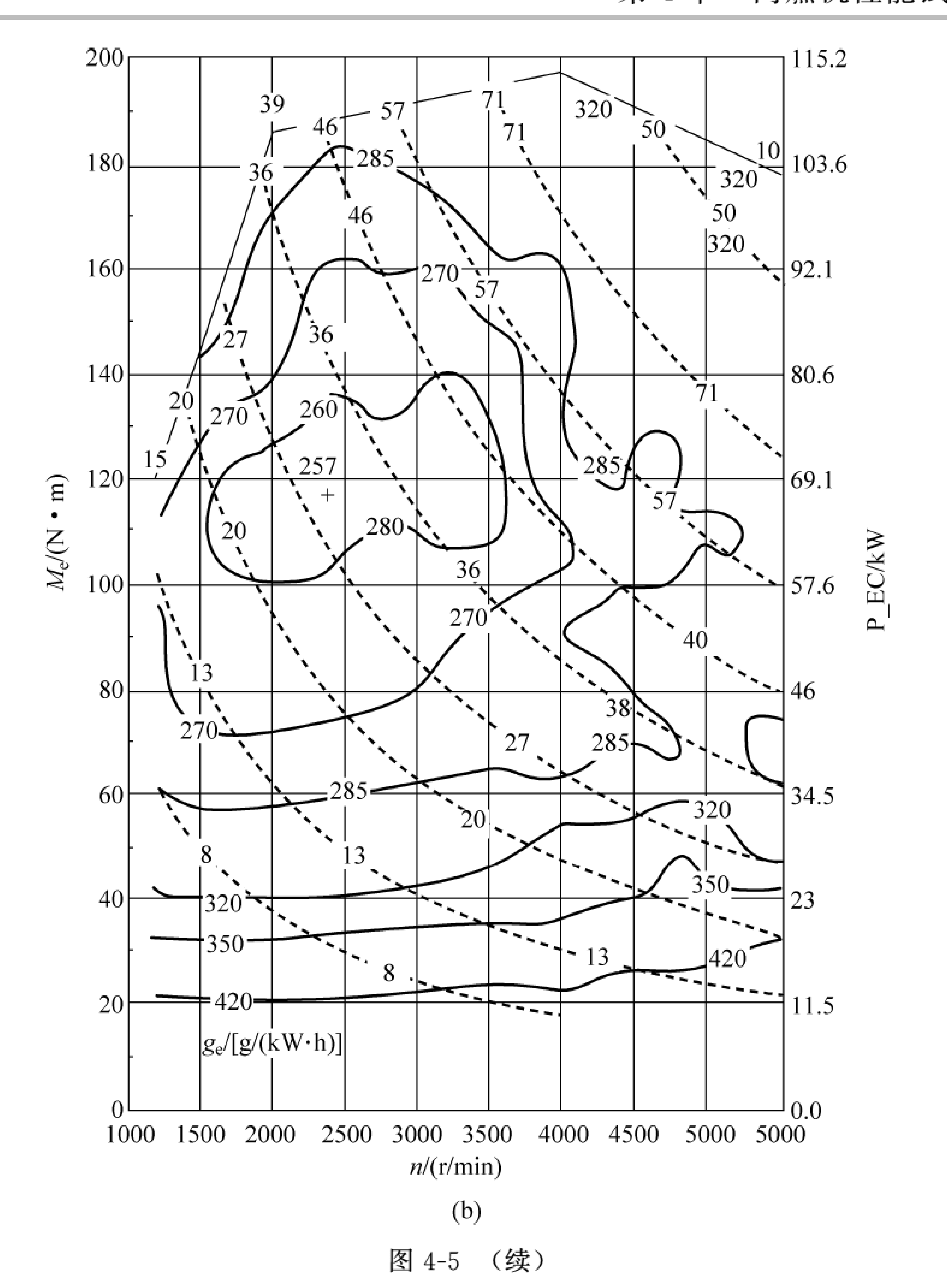


图 4-5 动力性、经济性万有特性曲线



(b)

图 4-5 （续）

计是很有意义的。例如，当内燃机向汽车输出某一功率时，可以找出该功率的等功率线上对应的最低耗油率点及相应的转速，根据所有输出功率值对应的最低耗油率转速来设计汽车的传动比，就可以使汽车获得最佳的经济性能，这正是汽车无级传动比设计选择的依据之一。当然通过万有特性曲线也可分析、计算整车各挡位、各种坡度、不同车速下的经济性和动力性等，从而制定出对内燃机设计修改、安全寿命、使用、保养等有利的一些参考数据。

通过万有特性曲线可分析内燃机的使用经济性。最内层的等油耗曲线的范围是经济性最好的区域。等油耗曲线横坐标方向较宽，表示内燃机在转速变化较大而负荷相对变化较小的情况下工作时，经济性较好，这种情况适用于车用内燃机，如图 4-5(b)所示。反之，如果等油耗曲线纵坐标方向较长，则表示内燃机在负荷变化较大而转速变化较小的情况下工作时，经济性较好，比较适合于对转速波动要求较高的领域，如发电机、工程机械以及农用车

辆(拖拉机)。

4.4.2 万有特性曲线的制取方法

万有特性没有专门的试验方法,是依据多条负荷特性曲线或多条速度特性曲线的数据绘制而成的,俗称“负荷特性法”或“速度特性法”。这两种方法汽油机都经常采用,而柴油机多采用“负荷特性法”。其绘制方法主要分为两种,即直接绘图法和软件辅助绘图法。下面以“负荷特性法”为例进行介绍。

1. 直接绘图法(以绘等油耗率线为例)

(1) 进行不同转速下的负荷特性试验,得到一组负荷特性曲线。为便于万有特性曲线的制作,应适当多作几条曲线(如 10 条或更多)。每条曲线上多做几个试验点(8～10 个点或更多),可减少试验过程的随机误差,提高综合试验精度。

(2) 将各转速下的负荷特性曲线集中画在 g_e-P_e 坐标图上,见图 4-6。

(3) 在 P_e-n 图上画外特性曲线,等 g_e 曲线不能超出此范围。

(4) g_e-P_e 图与 P_e-n 图分列 P_e 坐标轴的左右端且 P_e 的比例尺必须相同。

(5) 在 g_e-P_e 图上画多条等 g_e 曲线,每条等 g_e 线与每条负荷特性曲线相交于一点或两点(图上只画出一条等 g_e 线为例)。从相交点引平行线至 P_e-n 图,并从 P_e-n 图上相应的 n 点引垂直线与平行线相交,用光滑曲线连接 P_e-n 图上的这些交点,即为万有特性曲线的等 $g_{e,1}$ 曲线。同理作出其他的等油耗曲线,这样就可得到整个内燃机的等油耗万有特性图。

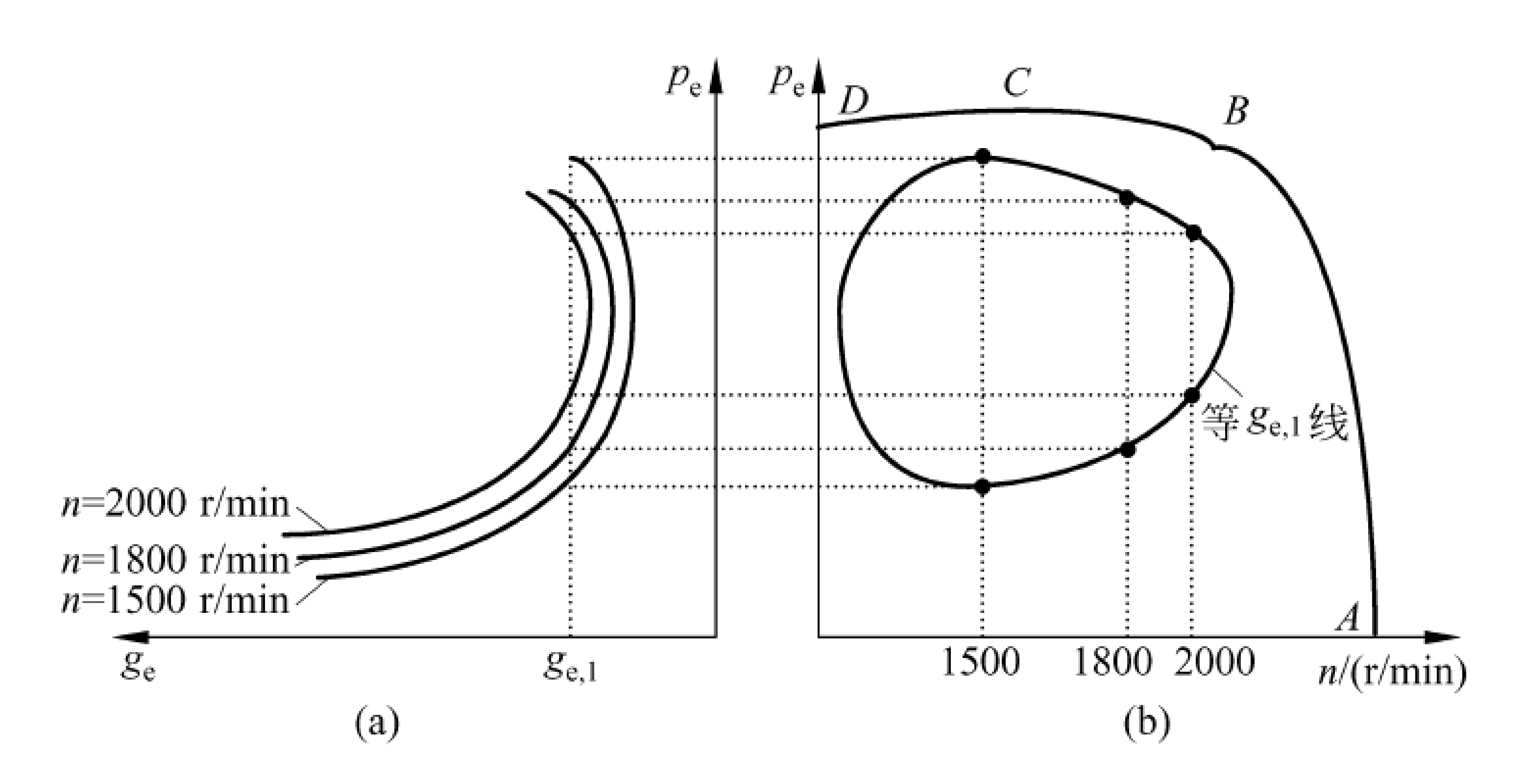


图 4-6 由负荷特性线作万有特性曲线图

(a) 负荷特性曲线;(b) 万有特性曲线

2. 软件辅助绘图法

用软件辅助绘图的方法很多,可以用 Excel、MATLAB 以及各种数据处理软件进行绘图,文献[4,5]介绍了用 MATLAB 语言绘制内燃机万有特性曲线的方法。本节以 Origin 为例进行简要作图说明。

(1) 打开试验数据文件 Excel 表格数据,导入到 Origin 文档,如图 4-7 所示。



图 4-7　导入文档

（2）令其中的转速为 x 轴，扭矩为 y 轴，另一列油耗率为 z 轴，如图 4-8 所示。

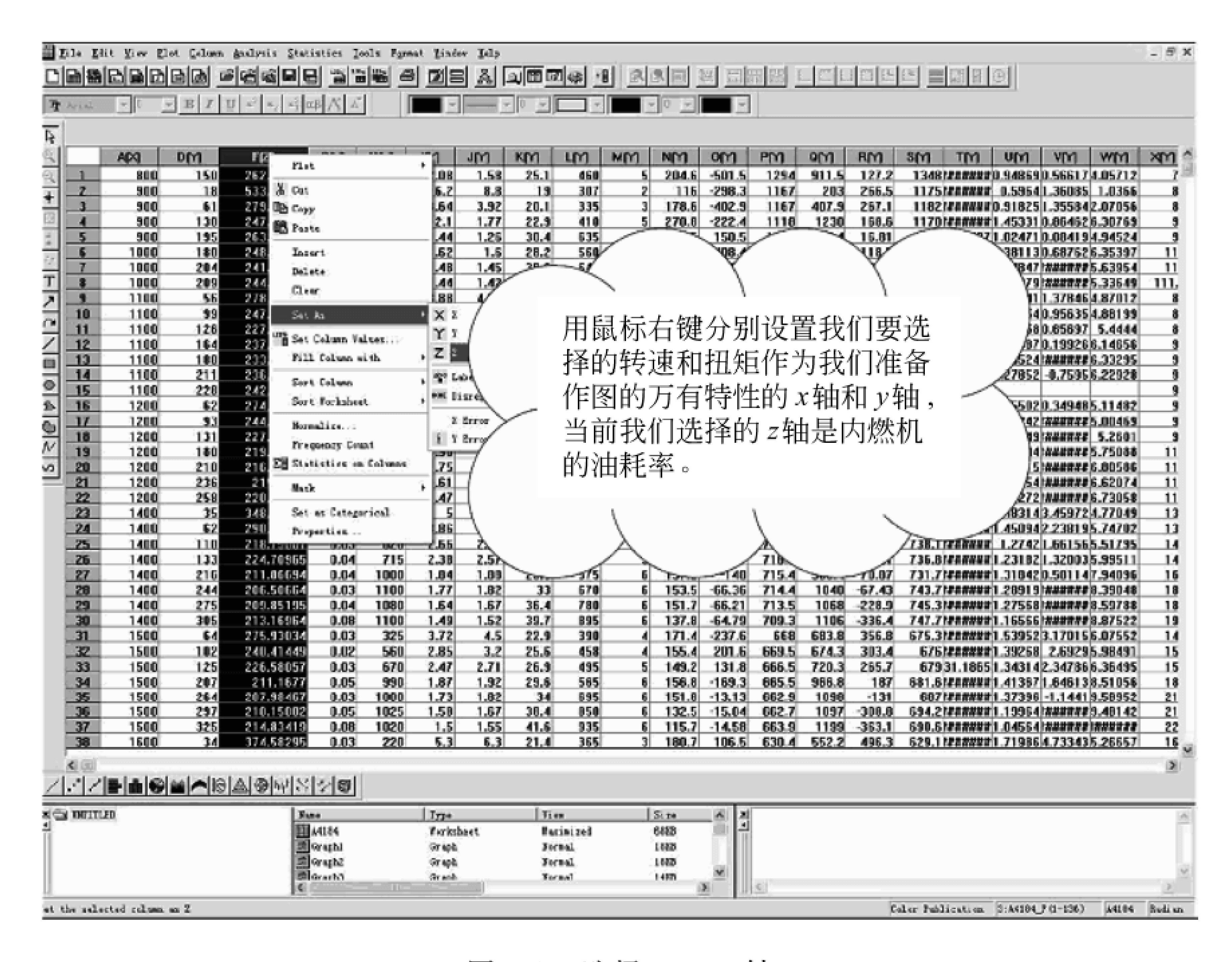


图 4-8　选择 x，y，z 轴

(3) 转换数据表为矩阵形式,如图 4-9 所示。



图 4-9 转换为矩阵形式

(4) 选择一一对应关系,并设置横纵点的个数,如图 4-10 所示。



图 4-10 选择对应关系

(5) 得到三维矩阵表,如图 4-11 所示。

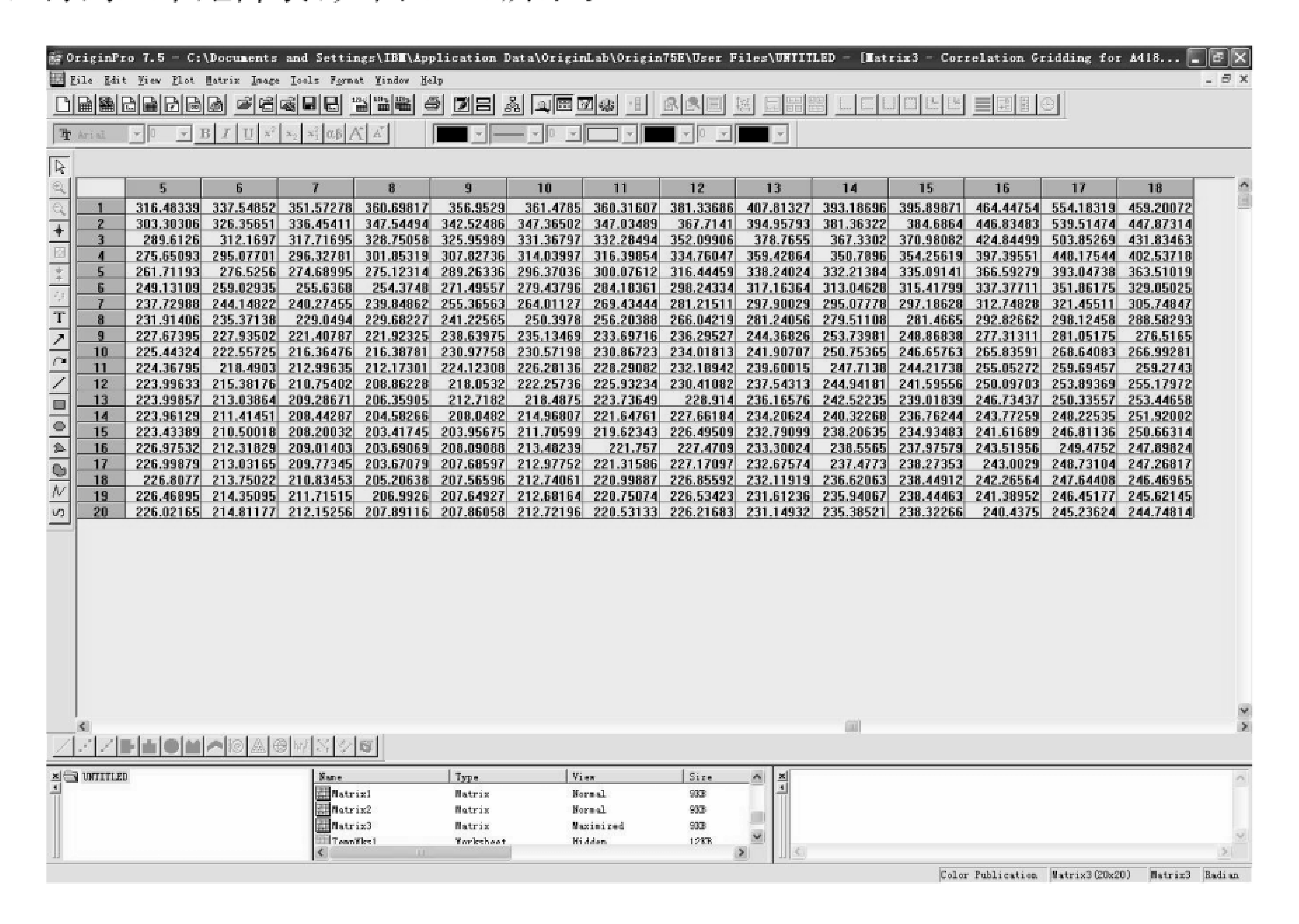


图 4-11　三维矩阵表

(6) 进行等高线画图,如图 4-12 所示。

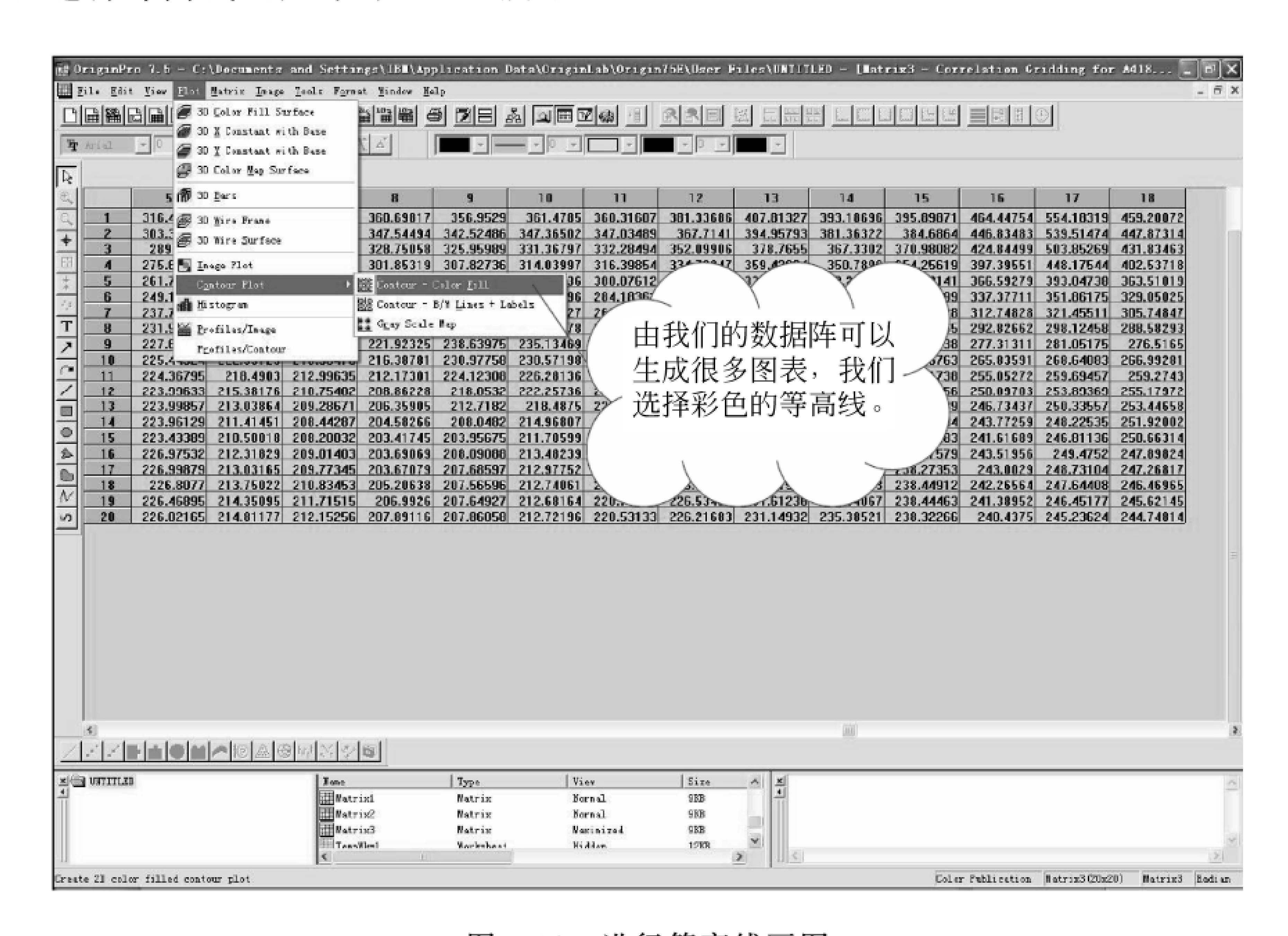


图 4-12　进行等高线画图

（7）生成油耗万有特性曲线，如图 4-13 所示。

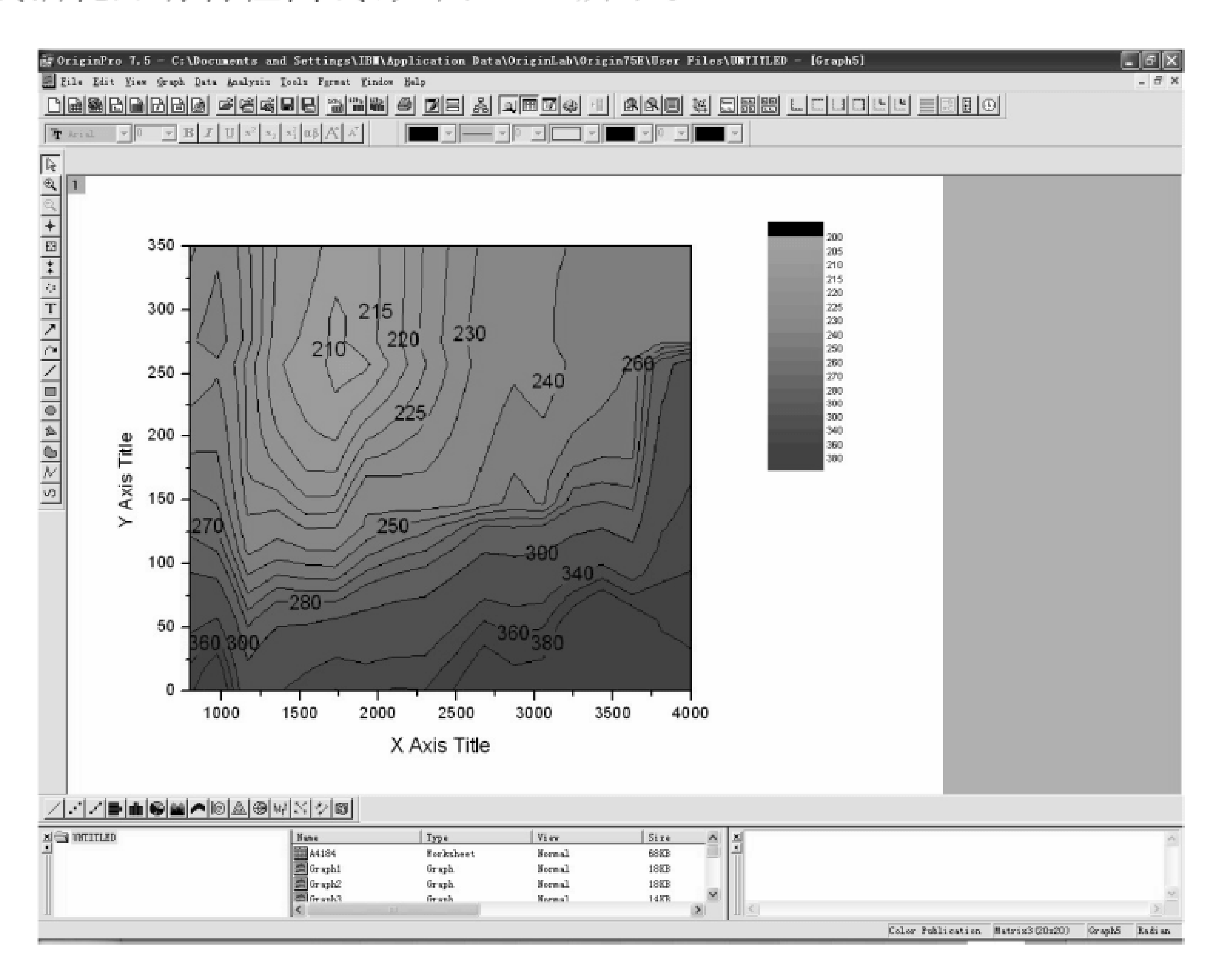


图 4-13　油耗万有特性图

（8）把超过内燃机工作范围的部分覆盖掉，或者做一些图例的设置。利用上述方法可以生成其他图表，如 NO_x 万有特性曲线，如图 4-14 所示。

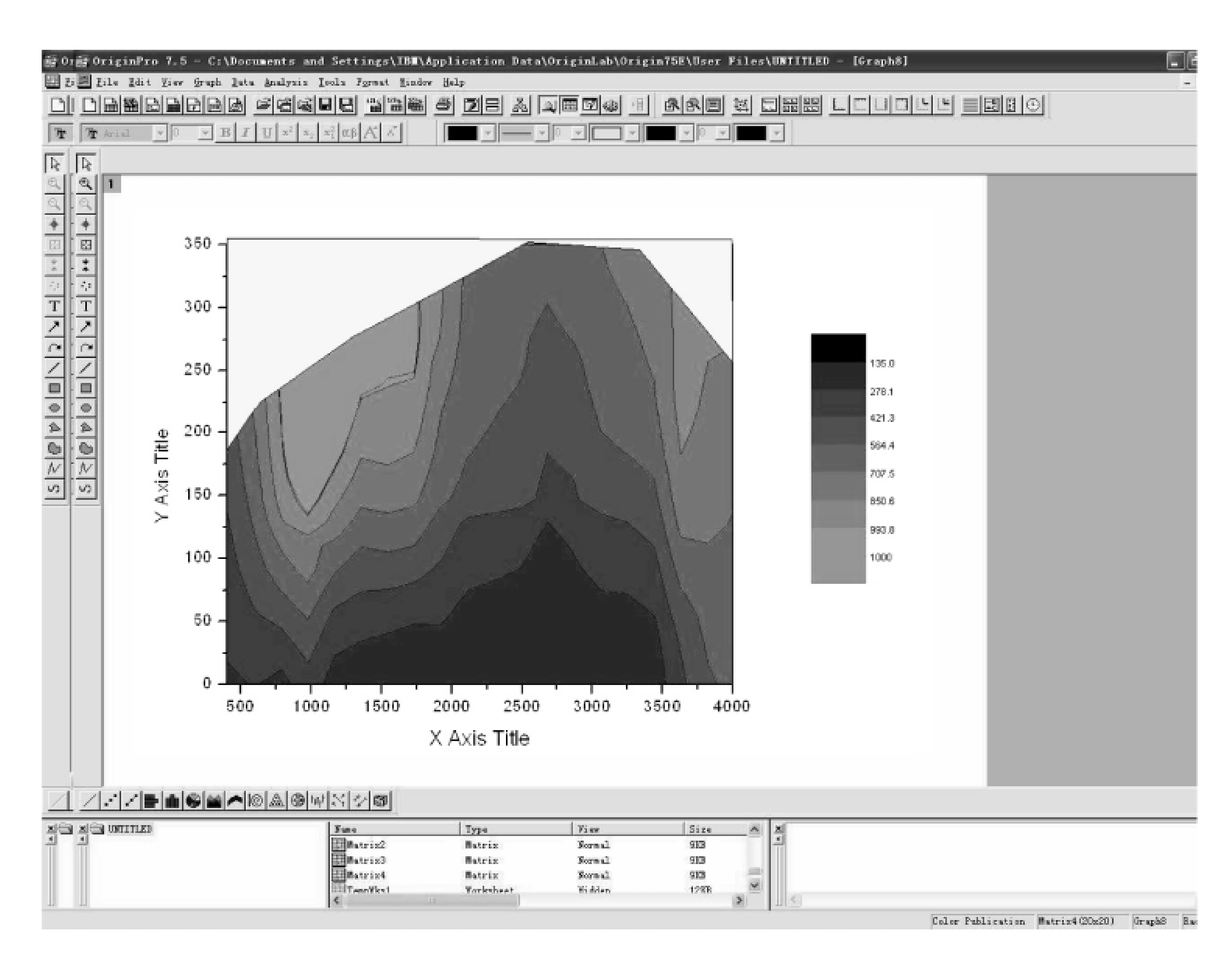


图 4-14　氮氧化合物（NO_x）特性曲线

也可以利用 Excel 制取万有特性曲线，如图 4-15 所示。

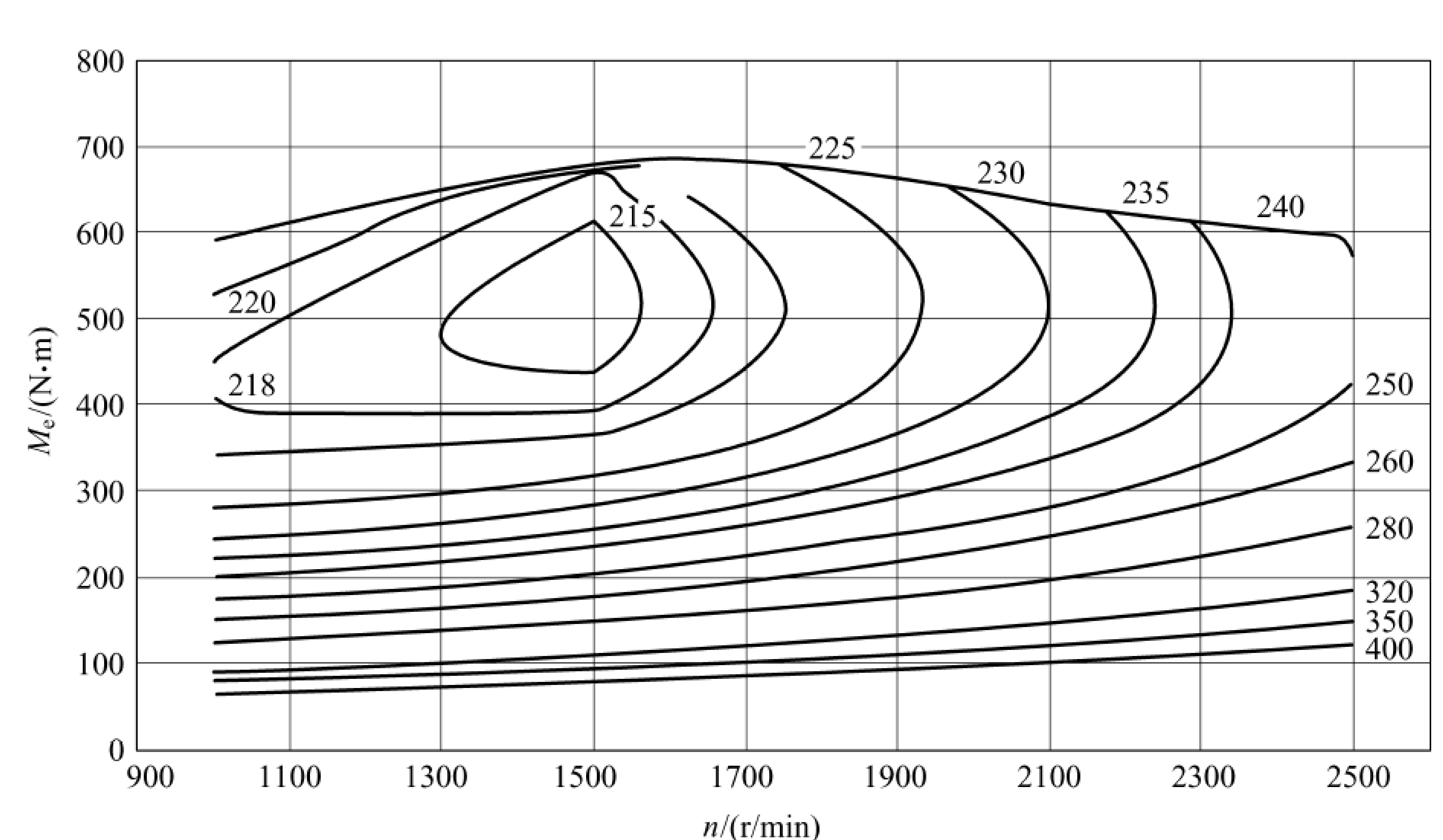


图 4-15　利用 Excel 制取某内燃机油耗特性曲线
（耗油率单位为 g/(kW・h)）

4.5　机械损失功率试验

评价内燃机机械损失大小的主要指标有机械损失功率和机械效率。机械损失功率指的是内燃机运行过程中的机械摩擦功率、附件功率和泵气损失功率之和，机械效率定义为内燃机的有效功率与指示功率之比，用于衡量内燃机机械损失大小的程度，其中机械效率可以用下式表示：

$$\eta_{mo} = \frac{P_{eo}}{P_{eo} + P_m} \times 100\% \tag{4-9}$$

式中：η_{mo}——机械效率；

P_{eo}——校正有效功率，kW；

P_m——机械损失功率，kW。

在测功机上利用倒拖法（详见后文）测定机械损失功率时，其计算式为

$$\begin{aligned} P_m &= \frac{2\pi W_m L n}{60 \times 1000} \\ &= 0.1047 \times 10^{-3} W_m L n \\ &= C W_m n \end{aligned} \tag{4-10}$$

式中：W_m——测功机磅秤读数，N；

L——测功机臂长，m；

n——转速，r/min；

C——测功机常数。

上述公式适合外壳是浮动式的电力测功机，对于不是浮动式外壳的电力测功机，通常在其轴上装有扭矩传感器，根据扭矩传感器测出的摩擦副总扭矩 M_m 计算内燃机摩擦功率。

机械效率在大功率输出时可以超过 80%，中低负荷时较低，怠速时则为零。乘用车在综合行驶工况下，内燃机指示功率的$\frac{1}{3}$～$\frac{1}{2}$是消耗在内燃机机械损失上的。由此可知，提高机械效率是提高内燃机性能指标不可忽视的因素，所以对于机械损失的精确测量也具有非常重要的意义。然而，精确测量机械损失是一个艰难的课题，至今还没有有效满意的解决方法。

关于机械功率损失的测量方法有很多种，文献[1]主要介绍了 9 种方法。本书重点介绍以下 4 种常用方法。

1. 示功图法

通过示功图测算出内燃机的工作过程功（指示功），再根据台架上测算得出的内燃机有效功率，可计算出内燃机机械损失功和机械效率。这种直接测定方法是在真实的试验工况下进行的，理论上是最合理的。实际应用时会面临如下一些问题。

（1）在多缸内燃机中，所有汽缸都需要绘制示功图，且应同时进行。这是因为各汽缸产生的功率是有差别的，即各缸产生的功率不应简单假设为相同。

（2）缸内压力测量误差很难精确控制。

（3）精确确定真实的上止点位置极为困难。

关于上止点位置测定及示功图制取的问题 3.2 节和 3.3 节已进行详细说明。测试结果表明，如果传感器测得的上止点处曲轴转动位置比真实值提前了 1°，计算出的指示平均有效压力就将比真实值大 5%；如果测得的上止点滞后了 1°，则计算结果比真实值小 5%。因此，精确地在上止点处产生一个信号是非常必要的，而要做到这一点则十分困难。

2. 倒拖法

倒拖法在具有电力测功机的试验条件下方可进行。电力测功机拖动内燃机运转，测功机所测出的功率即为内燃机的机械损失功率。

测量方法是先使内燃机带负荷运转，当内燃机水温和机油温度达到正常状态后迅速切断供油或切断点火（汽油机），立即将电力测功机转换为电动机运行，反拖内燃机到同样转速，此时测功机测出的功率即为机械损失功率。

这种测试方法的误差来源主要包括：

（1）在未点火的情况下，缸内压力显著下降，活塞、活塞环与汽缸套之间以及转动的齿轮之间的摩擦损失也随之下降。

（2）缸壁温度比不着火时显著下降，黏性阻力的上升会对上述效应产生一定的补偿。

（3）不着火条件下，排气温度下降，工质密度上升，使排气的泵气损失功加大。

这种方法在诸多机械损失测定方法中仍属于精度较高的一种，且方法简便，再现性好，还可以分解内燃机，测量每一对摩擦副的摩擦损失功率，为了解内燃机摩擦损失的根源和降低摩擦损失提供依据。试验时保证润滑油的温度和水温是非常重要的，这可避免摩擦功率过大的变化。国家标准 GB/T 18297—2001《汽车发动机性能试验方法》中规定机械损失功率试验方法采用倒拖方法，当然这是针对可能应用电力测功机的中、小型内燃机而言。

3. 灭缸法

灭缸法是内燃机在稳定工况下运转，且各缸点火或喷射装置被轮流关断的情况下进行，该技术只适合多缸内燃机和自然吸气内燃机，增压和增压中冷内燃机不适合。

当关断其中某缸后，测功器立刻调整以恢复内燃机转速，于是可以测出功率的下降量。在假定整机的总机械损失不变的条件下，该值与不工作的汽缸发出的指示功率应相等。对各缸分别进行相同操作，各缸功率下降值之和就被认为是内燃机的指示功率。于是再通过内燃机的有效功率就可以求出机械效率。

灭缸法本质上仍然是倒拖法，因此，此方法具有与倒拖法相同的误差来源，但由于内燃机基本处于正常工作状态，所以理论上误差应比倒拖法小。不过由于多缸机灭一缸后，进、排气压力波动态效应会影响各缸分配均匀性，以及通过灭一缸计算单缸指示功率时是两个大数(不灭缸与灭缸的总功率)相减，其相对误差会加大，所以其精度的高低仍是难以定量说明的问题。汽油机灭缸工作时，存在失火的安全隐患，试验时应加以注意。关于此法的详细内容见附录 A 试验 4。

4. 油耗线法

油耗线(威廉线)法的英文名为 Willan's line method。此方法仅适用于没有节气门的压燃式内燃机。从图 4-16 小时燃油消耗量随扭矩或平均有效压力变化曲线图中可看出，柴油内燃机在某一恒定转速下，在 75% 总功率以下部分近似为直线。在特性曲线的直线部分，任意增量燃料将产生相同增量的功率。

显然在零功率输出点，内燃机消耗的所有燃料都被用于克服机械损失，因此可以推断，油耗线直线段的反向延长线与横坐标相交，交点 O_1 到坐标 0 点间的负值即为机械损失值，如图 4-16 所示。

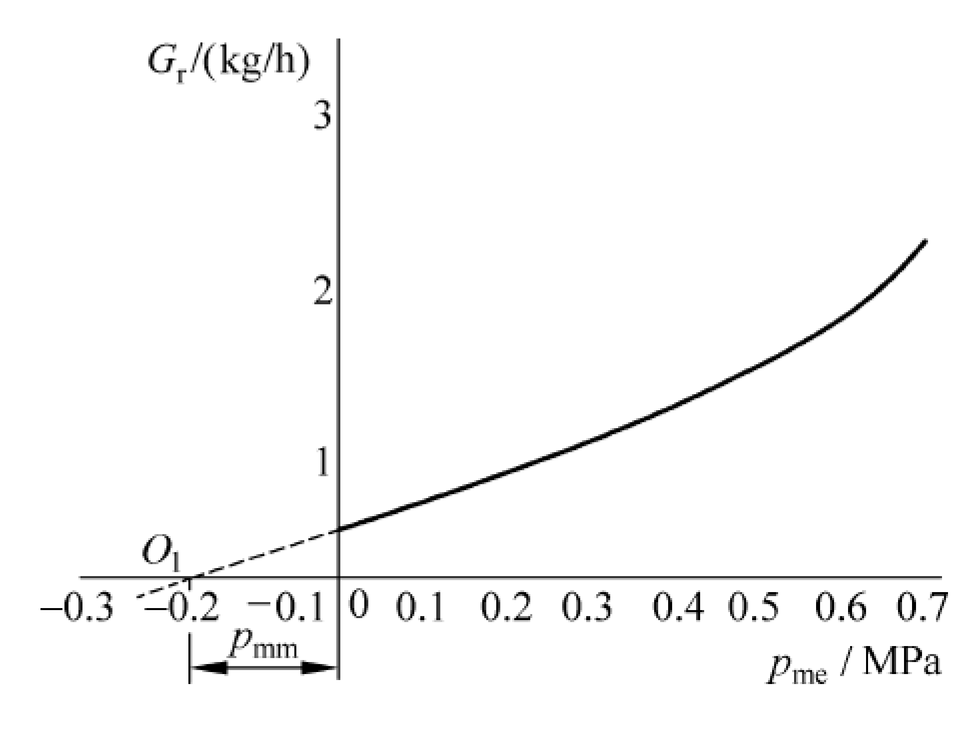


图 4-16 柴油机威廉线法

严格地说，此方法只适用于空载条件下的摩擦损失测评。因此，加载测试时，功率损失无疑会加大。此外，中低负荷段直线性的假设也存在一定的误差。因为该方法的优点是不用驱动装置就能测量，所以适合大型柴油内燃机，不使用进气节流的内燃机。

上述 4 种测量内燃机机械损失的方法均存在一定的误差，如果运用尽可能多的方法测量，并进行结果对比将更具有意义。文献[2]就机械损失的测量方法给出了现实的评价："内燃机机械损失的测量仍旧像一门'巧妙的艺术'。"

虽然无法得出机械损失的准确值，但是这些方法能够非常有效地监控各种结构和参数的改变对内燃机性能的影响。

最后还要指出，增压内燃机在反拖或灭缸时，增压器的工作状况会有很大变化，所以不能用此二法测定其机械损失功率。油耗线法也只在低增压机型中应用，且误差难以估算。目前除示功图法外，尚别无良策。

附录 A 试验 4 给出了汽油机采用灭缸法进行机械损失功率的试验方法。

4.6 起动性能试验

要使内燃机由静止状态过渡到工作状态，必须先通过外力转动内燃机曲轴，使汽缸内先吸入(或形成)可燃混合气，并使其燃烧做功，达到能持续自燃的最基本条件后，内燃机工作循环才能自动进行。

内燃机的起动是指从曲轴在外力作用下开始转动到内燃机能维持自动运转的全过程。对于汽车用内燃机来说，起动性能是一个非常重要的性能指标，因为汽车必须保证在规定的各种使用环境条件下顺利起动，才能正常地工作。为此，在 GB/T 18297—2001《汽车发动机性能试验方法》中规定：对于定型的内燃机，汽油机在低温环境温度 255 K、柴油机在 263 K 的条件下，不采用特殊的低温起动措施，应能起动运转，在中温及热机(温度均在(361±5)K)及规定的条件下，能顺利起动。

内燃机在低温条件下，由于进气温度低、燃料雾化差、机油黏度增高、蓄电池供电能力降低等因素，所以会造成内燃机起动困难。为了保证在更低温度下的起动性能，应采取辅助起动措施，例如各种结构的冷却液和机油的加热器、进气空气加热器，以及加注冷起动燃料等。

起动试验的目的是评定内燃机的低温、中温及热机起动性能及起动时的排放性能。起动性能的优劣主要取决于起动内燃机所需要的拖动时间。

在进行起动试验时，被测内燃机及其附件可装在一个特制的支架上，或装在汽车上，并置于试验的环境温度中。如果内燃机装在实验室，则内燃机不与测功器相连。装在汽车上，其动力系统若是自动变速器，则应置于"停车"状态；若是手动变速器，应置于"空挡"，且离合器先后处于结合状态和分离状态，并按制造厂使用说明书的规定程序进行设置和操作。

起动试验要特别注意起动时间的测量，即试验是从按动起动电门接通起动机开始计时，起动机拖动内燃机 15 s 以内若能自行运转，并且运转 10 s 以上不熄火，则认为起动成功。

若起动失败，则按制造厂使用说明书的规定程序再次进行设置和操作，在 3 min 内继续进行下一次起动；低温起动时须待冷却液、润滑油及电解液达到规定的环境温度，方可进行下一次起动。若 3 次起动失败，则终止该项试验。

起动试验测量项目主要包括：环境温度、进气状态、起动失败次数和起动成功的拖动时间；起动机和蓄电池的最低工作（即拖动时的）电压、拖动及自行运转的内燃机转速、起动电流、进气管绝对压力等与时间的关系曲线；起动前冷却液、各种润滑油及电解液的温度以及汽油牌号及馏程、柴油牌号等。

内燃机起动性评价，是通过对其起动试验后的数据进行处理，根据处理后的数据进行评价，评价方法参考标准 GB/T 18297—2001。

4.7　怠速试验

汽车在行驶过程中，需要经常用到内燃机的怠速工况（此时所指均为最小油门开度时的低速怠速），例如汽车起步前及短时间内的停车等，都要求内燃机处于怠速转速且转速平稳，并能非常圆滑地过渡到汽车的起步、行驶工况。因此，在该工况下的内燃机性能、排放及整车的驾驶性就显得尤其重要。

考核和评价内燃机怠速质量的标准是：内燃机处在低温冷机及热机状态下，无负荷时，内燃机怠速运转的平顺性（如转速波动量）、运转持续性（不熄火）及排放污染物等。

1. 怠速工况

怠速工况指内燃机无负荷运转状态，即离合器处于接合位置，变速器处于空挡位置（对于自动变速箱的车应处于“停车”位置或“P”挡位），油门踏板处于完全松开位置时的稳定运转工况。

2. 试验方法

怠速试验分低温冷机怠速试验及热机怠速试验两项内容。

1）低温冷机怠速试验

在标准规定的试验条件及规定的低温下，起动机停止拖动，内燃机能自行运转时，即开始低温冷机怠速试验。手动变速器先在空挡离合器接合位置，运行 20 s，终了时记录数据；随后在空挡离合器分开位置，运行 20 s，终了时记录数据。若是自动变速器，则在“停车”挡位置，运转 20 s，终了时记录所需测量项目数据。

2）热机怠速试验

内燃机在 40%～80%的额定转速下运行，待冷却液出口温度达到（361±5）K 时，油门回到怠速工况的位置，环境温度不限，即可开始怠速热机试验。手动变速器在空挡离合器接合位置，运行 20 s，终了时进行数据测量。若是自动变速器，在“停车”挡位置，运转 20 s，终了时进行数据测量。

3）测量项目及数据整理

试验测量项目主要包括：进气管绝对压力或真空度，怠速（或高怠速）燃料消耗量，点火提前角，喷油（或供油）提前角，瞬时怠速的最高、最低及平均转速，熄火次数，怠速质量的分

数(怠速质量评定见表 4-2)。根据上述测量数据,按内燃机怠速质量(即运转的平顺性及怠速持续能力)给出评分及评语。

怠速转速波动率(Ψ_2)计算公式为

$$\Psi_2 = \frac{|n_{i\max或\min} - n_{im}|}{n_{im}} \times 100\% \tag{4-11}$$

式中:$n_{i\max}$——怠速的最高转速,r/min;

$n_{i\min}$——怠速的最低转速,r/min;

n_{im}——怠速的平均转速,r/min。

表 4-2 怠速质量评定

评　语	分数	怠速质量
优秀	9	不太感觉内燃机在怠速运转
很好	8	清晰地感觉到在运转,但运转平顺
好	7	运转略有振动,但无反感
尚可	6	运转略微粗暴,但运转稳定
及格	5	运转中度粗暴
不及格	4	运转粗暴,但能维持运转,不熄火
不太可靠	3	运转严重粗暴、维持运行无把握,可能熄火
不可靠	2	熄火一次,在怠速工况难以维持持续 20 s 的运转
很不可靠	1	熄火两次或两次以上,不能维持运转,人为操纵油门才能继续运转

关于汽车内燃机怠速排放测量参见第 5 章。

内燃机其他性能试验项目叙述如下。

(1) 压燃机调速特性试验　目的是用稳定调速率来评定压燃机的调速性能。适用于非电控的柱塞泵燃油喷射车用柴油机。由于调速时转速变化范围小,所以调速特性试验曲线近似于负荷特性曲线,试验方法也大致相同。

(2) 各缸工作均匀性试验　多缸机各缸工作均匀性包括进气均匀性、燃料供给均匀性和燃烧均匀性。它与内燃机的燃料经济性、爆震强弱、功率输出大小及排气污染物都有关联。为此点燃内燃机需进行压缩压力试验及各缸排气中 CO 或空燃比测量,压燃机需进行单缸熄火功率试验。压缩压力试验的目的是评定点燃机各缸进气的分配均匀性;各缸排气中 CO 测量或空燃比测量试验,目的是评定汽油机各缸混合气空燃比的均匀性;单缸熄火功率试验,则是评定非增压压燃机的各缸指示功率的均匀性。

(3) 机油消耗量试验　目的是评定内燃机在规定工况下的机油消耗量。

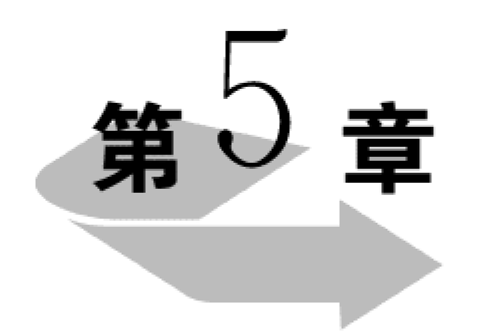
(4) 活塞漏气量试验　目的是评定活塞组与汽缸套的气体密封性,亦可用来监测这对摩擦副的工作情况。

上述所介绍的试验为内燃机最基本的常用试验项目。在设计研发过程中,研发人员往往是利用上面的试验方法,通过调整优化,使内燃机达到功率大、用油少、排放低、工作可靠、

起动顺利等目的。

参 考 文 献

[1] 日本自动车技术会. 汽车工程手册 6：动力传动系统试验评价篇[M]. 中国汽车工程学会，组译. 北京：北京理工大学出版社，2010.
[2] MARTYR A J, PLINT M A. Engine Testing Theory and Practice[M]. London: Butterworth and Heinemann, 2007.
[3] 王忠，历宝录. 柴油机整机与零部件机械损失的评价指标及实验分析[J]. 中国机械工程，2006(22)：2387-2391.
[4] 易雪梅，吴伶. 用 MATLAB 语言绘制内燃机万有特性的两种方法[J]. 北京汽车，2005(5)：33-35.
[5] 黄美美，赵志伟. 基于 MATLAB 语言的内燃机万有特性曲线的绘制[J]. 现代制造技术与装备，2011(5)：19，24.



可靠性试验

产品的质量指标有很多种,例如,一台内燃机的指标就有额定功率、最低燃料消耗率、额定转速、怠速转速、最高空转转速、最大扭矩、有害排放物、噪声等。这类质量指标通常称为性能指标,即产品完成规定功能所需的指标。除此之外,产品还有另一类质量指标,即可靠性指标,它反映产品保持其性能指标的能力。

5.1 可靠性定义

可靠性的英文是 reliability,它是 rely(可靠)和 ability(能力)的合成语。可靠性是产品在规定的条件下,在规定的时间内,完成规定功能的能力。这里主要包含了 4 个主要因素,即试验对象、规定条件、规定的时间及功能。

(1) 汽车能源动力可靠性试验中的对象是指试验内燃机、动力电池、燃料电池系统和动力系统等,为了对试验对象进行正确的可靠性分析或计算,需对所研究试验对象的各个方面有充分的了解。

(2) 规定的条件是指试验产品的使用条件、维护条件、环境条件和工作条件,如气候(温度、湿度、大气压)、燃料和机油、试验工况等。

(3) 规定的时间是由用户的要求或设计目标决定的,如对于内燃机产品的工作期限,可以用时间单位、里程或其他单位表示。可靠性与一般的质量指标的区别在于它是一种时间质量指标。一般质量指标在产品出厂时可以考核,而可靠性需要经过一定的工作时间后才能评定。如内燃机在进行可靠性考核时,是按试验标准中规定的强化运行工况运行,与正常工作运行的情况有差别,其目的是减少试验时间,降低试验费用,提高产品开发速度。考核时强化运行工况所对应的内燃机试验所需的时间应与真正产品的工作期限有当量关系。国家试验标准中规定的考核时间有 500、1000 或 400h,企业内部考核标准不仅在强化程度上高于国家标准,且考核时间也会增加。

(4) 规定的功能是指产品使用说明书、设计任务书及国家标准中规定的各种功能或性能要求,例如内燃机动力性、经济性、排放性及噪声等,不能完成规定功能就是不可靠,称为

发生了故障或失效。

因此,对能源动力来讲达到可靠性是指其产品在预期的使用期限内和规定的条件下,主要性能指标在允许的范围内,不发生损坏或停车,或发生故障易迅速修复。

5.2　可靠性试验的意义及内容

产品的可靠性是设计和制造出来的,也是试验出来的。可靠性试验工作贯穿于产品的全寿命周期,是评价产品寿命与可靠性的一个重要手段,是可靠性工程的重要组成部分。可靠性试验是为了了解、评价、分析和提高产品可靠性水平而进行的各种试验的总称。其主要目的是验证产品的可靠性,揭露产品的薄弱环节,制定提高产品可靠性的措施,建立合理的维修制度,考核产品的使用效果和经济合理性。根据不同的试验目的,相应地有不同的可靠性试验内容和方法。以下几小节及后面的各章节均是以燃油内燃机为例简要介绍相关可靠性试验内容及方法。

1. 内燃机零部件可靠性试验

内燃机零部件可靠性试验是依据产品设计的要求,对某些关键零部件按照特定的试验规范进行验证性试验。由于这些试验往往采取超常规的交变负荷及热负荷工况,故在短时间内就能检验出该零部件的设计结构、配合间隙、工艺、材料等的选择是否合理,为整机可靠性试验提供技术依据。而其试验结果最终仍需通过整机可靠性试验来加以验证。零部件可靠性试验项目很多,试验规范也有较大差异,典型的试验项目有:曲轴疲劳试验、连杆疲劳试验、活塞快速磨合试验、活塞可靠性试验、缸套冷态磨损试验、配气零部件的快速疲劳试验、汽缸垫强化试验、汽缸垫渗漏试验等。

2. 内燃机可靠性试验

内燃机台架可靠性试验是根据试验对象的机型和考核目的,按照试验规范的要求进行的。需要注意的是,生产企业出于市场竞争的要求,为充分揭示和了解影响自身产品可靠性和寿命的因素,找出问题所在,对产品的可靠性考核无论是在试验条件苛刻程度上还是试验要求上均要严于国家标准,并严格保密。因此,本节仅介绍国家标准。

国家标准 GB/T 19055—2003《汽车发动机可靠性试验方法》介绍了我国目前广泛采用的几种可靠性考核试验规范。常用的试验项目有:模拟道路行驶状况的交变工况试验、混合负荷试验、全速全负荷试验、冷热冲击试验。试验规范及运行时间见表 5-1。

从表 5-1 中可看出汽车内燃机被分为三类:一类是最大总质量小于 3.5 t 的汽车内燃机;一类是最大总质量在 3.5～12 t 之间的汽车内燃机;一类是汽车最大总质量大于 12 t 的汽车内燃机。对最大总质量小于 3.5 t 的汽车用内燃机采用交变负荷试验规范,这样更接近小型内燃机多工况交变使用的情况;相对于 3.5 t 以下的汽车用内燃机而言,对于最大质量大于 12 t 的汽车用内燃机则应采用全速全负荷试验,以接近重型汽车多为高速大负荷

使用的实际情况；对最大总质量在3.5～12 t之间的汽车内燃机，因其使用工况介于以上二者之间，采用混合负荷试验规范。冷热冲击试验过去仅在压燃机上进行，现已扩展到点燃机，并增加了“停车”工况，使零部件承受的温度变化率加大。

表 5-1　不同最大总质量汽车内燃机可靠性试验规范及运行持续时间　　h

装机汽车类别[a]（按 GB/T 15089）	负荷试验规范（在1号内燃机上进行）[b]			冷热冲击试验规范（在2号内燃机上进行）[b]
	交变负荷	混合负荷	全速全负荷	
汽车最大总质量≤3500 kg	400			200
3500 kg＜汽车最大总质量≤12000 kg		1000		300
汽车最大总质量＞12000 kg			1000	500

(a) 装乘用车及商用车的内燃机均按本表分类；

(b) 可靠性试验用内燃机通常备有两台，1号机用于做负荷试验，2号机用于做冷热冲击试验。

下面对所述几种试验项目分别进行介绍。

(1) **交变工况试验**　该试验的最大特点是内燃机工况在短时间内变化，表5-2和图5-1显示了其试验规范。其详细试验过程将在5.3.1节试验方法中介绍。

表 5-2　交变负荷试验规范

工况序号	内燃机转速[a]	油门开度/%	经历时间/min	总时间/min
1→2	n_M（均匀变化到）n_P		1.5	1.5
2	n_P		3.5	5
2→3	n_P（均匀变化到）n_M		1.5	6.5
3	n_M		3.5	10
3→4	n_M（均匀变化到）n_P	油门全开	1.5	11.5
4	n_P		3.5	15
4→5	n_P（均匀变化到）n_M		1.5	16.5
5	n_M		3.5	20
5→6	n_M（均匀变化到）n_P		1.5	21.5
6	n_P		3.5	25

续表

工况序号	内燃机转速[a]	油门开度/%	经历时间/min	总时间/min
6→7	n_P（均匀变化到）n_i 怠速运行	油门关闭	4.5	29.5
7→8	n_i（均匀变化到）1.05 n_r	全关→全开	0.25	29.75
8→1	1.05n_r（均匀变化到）n_M	油门关小	0.25	30（归零）

（a）n_M——最大净扭矩的转速；n_P——最大净功率的转速；n_i——怠速；n_r——额定转速。

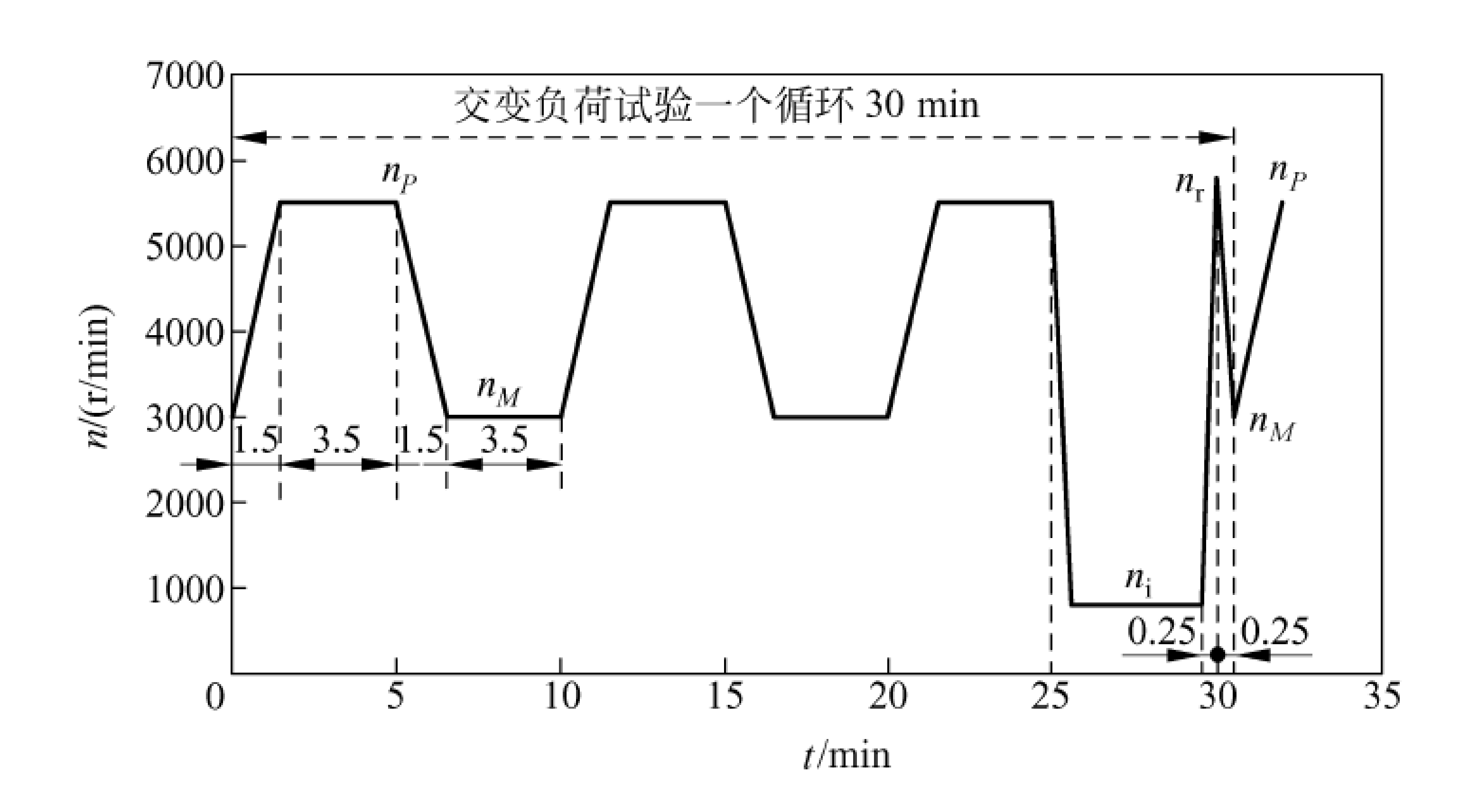


图 5-1　交变负荷试验规范示意图（实线表示油门全开）

（2）**混合负荷试验**　采用不同负荷工况组成了一个试验循环。表 5-3、图 5-2 显示了其试验规范和循环图。从表中可看出不同工况间的转换是在 1 min 内完成，内燃机转速和负荷是均匀地改变。标准中规定每循环历时 60 min，共 1000 个循环，运行持续时间为 1000 h。

表 5-3　混合负荷试验规范

工 况 序 号	内燃机转速	负　　荷	工况时间/min
1	怠速 n_i	0	5
2	最大净扭矩的转速 n_M	油门全开	10
3	最大净功率的转速 n_P	油门全开	40
4	额定转速 n_r	油门全开	5

（3）**冷热冲击试验**　该试验的特点是内燃机在不同工况时，冷却水出口温度是变化的。其试验规范如表 5-4 和图 5-3 所示。每循环历时 6 min，其运行持续时间需根据不同的最大总质量汽车用发动机而定，从表 5-1 可看出，最大总质量小于 3.5 t 的汽车用内燃机运行持

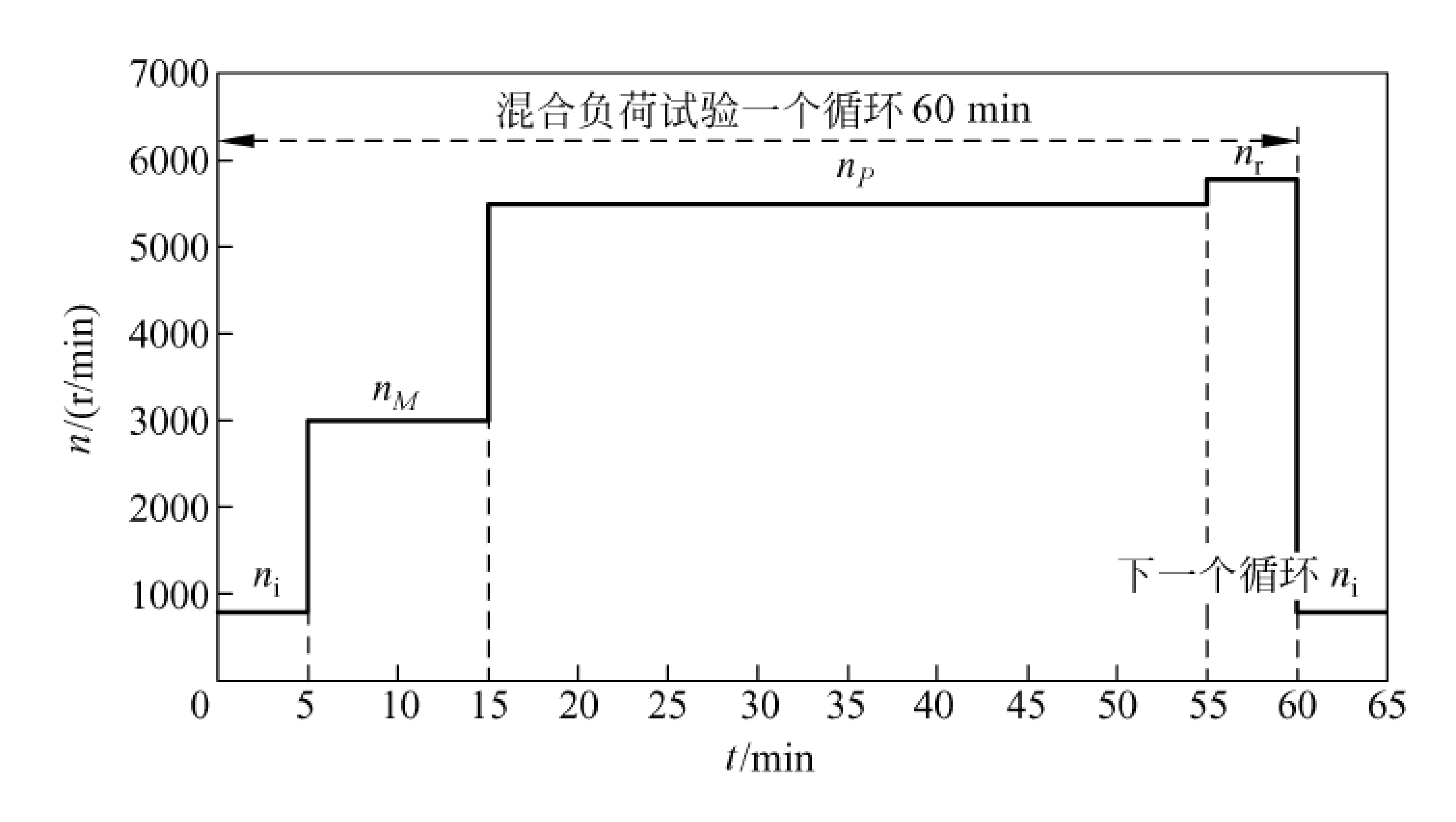


图 5-2 混合负荷试验循环

续时间为 200 h，最大质量大于 12 t 的汽车用内燃机冷热冲击试验持续时间为 500 h。介于以上二者之间的则为 300 h。

表 5-4 冷热冲击试验规范

工况序号	转　　速	负荷	冷却水出口温度/K	工况时间/s
1(热)	最大净功率的转速 n_P	油门全开	升至(378±2)(1)或(385±2)(2)	t_P
2	怠速	0	自然上升	15
3	0	0	自然上升	15
4(冷)	最大净功率的转速 n_P 或高怠速 n_{hi}	0	降至 311(3)	$360-(t_P+15+15)$

(1) 散热器盖在绝对压力 150 kPa 放汽时，冷却水温升至(378±2)K，或按内燃机制造厂的规定。
(2) 散热器盖在绝对压力 190 kPa 放汽时，冷却水温升至(385±2)K，或按内燃机制造厂的规定。
(3) t_P 为内燃机自行加热至出水温度所需的时间。

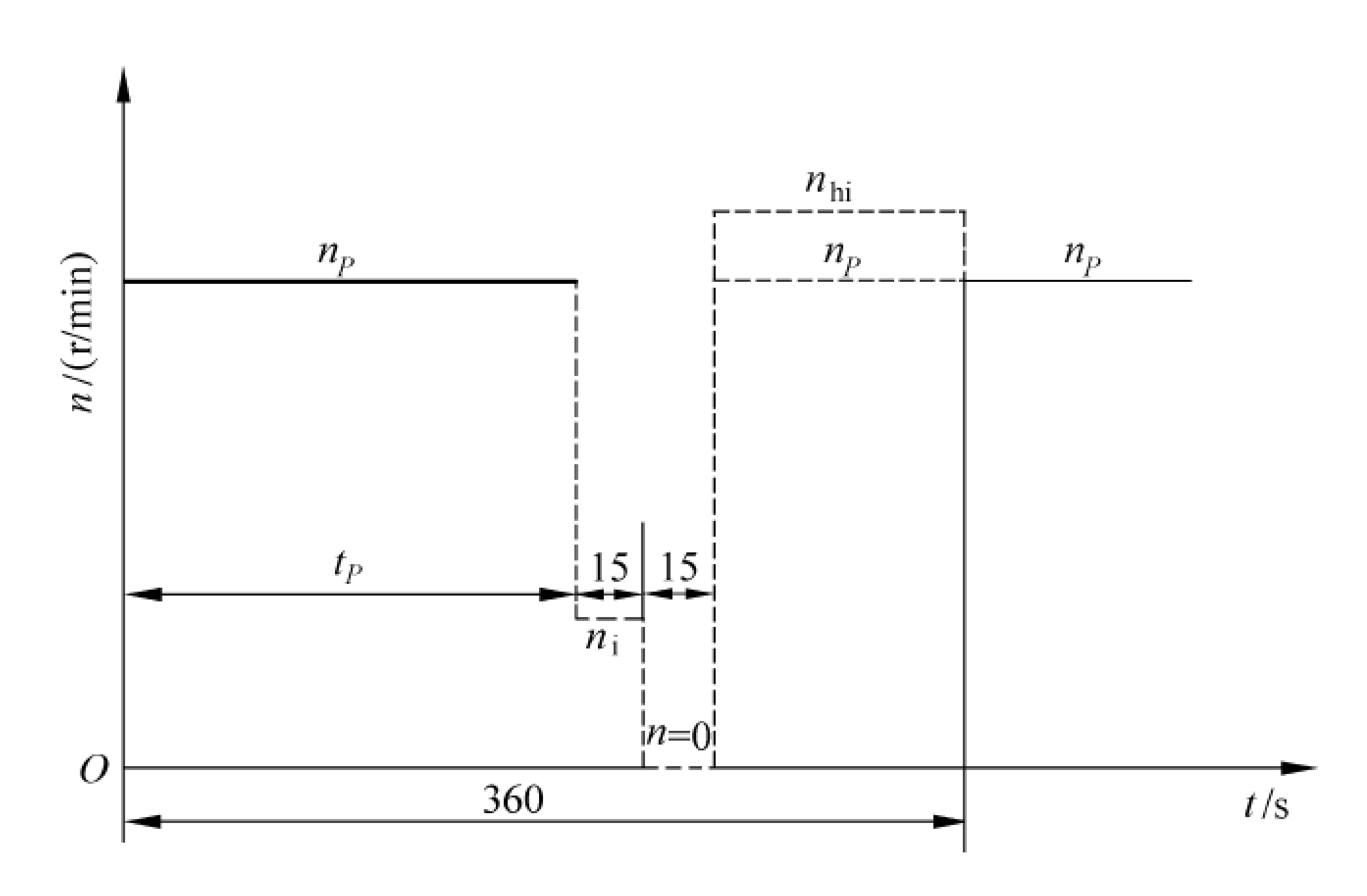


图 5-3 冷热冲击试验循环(实线表示油门全开)

(4) **全速全负荷试验**　该试验是内燃机油门处于全开位置，内燃机以额定转速长时间运行，规定时间为 1000 h。其试验规范如表 5-5 所示。

表 5-5　全速全负荷试验规范

转　　速	负　　荷	运行持续时间/h
额定转速 n_r	油门全开	1000

5.3　可靠性试验方法

在进行汽车内燃机可靠性试验前，首先要按内燃机制造厂的磨合规范对内燃机进行磨合，然后对内燃机进行性能初试。初试项目主要包括内燃机净功率、负荷特性、机械损失功率、活塞漏气量及机油消耗量。试验需按标准 GB/T 18297—2001 的 8.3、8.4、8.7、8.10 及 8.9.3 条款的规定进行。机油消耗量测量仅在内燃机额定转速全负荷下运行 24 h 进行。进行可靠性试验后，需对内燃机性能进行复试，试验方法及项目同发动机性能初试。

内燃机可靠性试验的详细内容和过程、试验条件、检查、维护及评价方法在国家标准 GB/T 19055—2003《汽车发动机可靠性试验方法》中均有详细说明。进一步信息可参考文献[1,2]等。本节以其中的交变负荷试验为例简要说明其试验方法及可靠性评价的基本概念。

5.3.1　试验方法

以交变负荷试验方法为例说明，参考表 5-2 及图 5-1。首先内燃机油门全开，然后内燃机从最大净扭矩的转速 n_M 均匀地升至最大净功率的转速 n_P，历时 1.5 min；n_P 稳定运行 3.5 min；随后均匀地降至 n_M，历时 1.5 min；n_M 稳定运行 3.5 min。重复上述交变工况，运行到 25 min 为止，立即关闭油门。

当油门关闭时，转速下降至怠速 n_i 运行到 29.5 min；再开大油门，无负荷条件下使转速均匀上升到 105%额定转速（105% n_r）或上升到内燃机制造厂规定的最高转速，历时 (0.25±0.1)min；随即均匀地关小油门，使转速降至 n_M，历时 (0.25±0.1)min。至此完成了一个循环，历时 30 min。整个试验共运行 800 个循环，持续时间约为 400 h。

表 5-2 中的最大净功率的转速是指不高于额度转速的情况下，内燃机带全套车用附件（见表 1-2）所输出的最大校正有效功率时的转速，符号为 n_P；最大净扭矩的转速是指内燃机带全套车用附件所输出的最大有效扭矩时的转速，符号为 n_M；额定净功率是指内燃机带全套车用附件，在额定转速下，全负荷时所输出的校正有效功率。

5.3.2　试验过程中的检查

内燃机进行可靠性试验过程中，主要的工作有：对内燃机进行定时检查：每 1 h 检查；

每 24 h 检查；每 96 h 检查等直到试验终了检测。每次检查的项目不同，试验者需根据国标或企业标准制定检查项目。如标准 GB/T 19055—2003 规定内燃机每运行 1 h 后，需要记录内燃机最大校正净扭矩、校正最大净功率、额定净功率、点火提前角、燃料消耗量、机油压力及温度、进气管内压力及温度、排气温度、燃料温度、运行工况下全负荷活塞最大漏气量及运行持续时间(h)，并画在以运行持续时间为横坐标的监督曲线上等。内燃机可靠性终了试验检测主要包括：测量机油消耗量、汽缸压缩压力、气门间隙及气门下沉量等，然后全面拆卸，进行主要磨损件精密测量及表面观察。

5.3.3 试验评价

试验评价是可靠性试验非常重要的一项内容，标准中对其进行了详细的说明，主要评价项目有：机件的磨损及损伤情况、动力性下降及经济性恶化的程度、机油消耗量及活塞漏气量的变化情况、排放值的变化情况，以及内燃机首次故障时间、故障停车次数、机能率及故障平均间隔时间。以下两项是人们在做可靠性试验研究中最为关注的内容。

1. 关于内燃机动力性评价

标准中规定，内燃机在运行过程中，校正最大净扭矩、校正最大净功率及额定净功率下降值不应超过初始值的 5%。

2. 内燃机可靠性试验

内燃机可靠性试验故障采用机能率和故障平均间隔时间来评定，表达式如下：

$$\text{机能率} = \frac{\text{运行时间}}{\text{运行时间} + \text{维护时间} + \text{故障时间}} \times 100\%$$

$$\text{故障平均间隔时间} = \frac{\text{运行时间}}{\text{故障停车次数}}(\text{h/次})$$

进行可靠性试验时，内燃机是在很苛刻的条件下工作的，标准所规定的试验时间大致与其工作寿命时间相当，因而可靠性试验结果可以较客观地反映内燃机在实际使用过程中的可靠程度及工作寿命。

对汽车内燃机来说，可靠性试验可以在台架上进行，也可以装车进行路试。在对内燃机进行可靠性评价的同时还经常用到耐久性的概念。内燃机耐久性是指内燃机在规定的使用与维修的条件下，在规定的时间内完成规定功能的能力。通常将内燃机的大修里程(即内燃机从出厂到第一次大修之间汽车行驶的里程数)或内燃机第一次大修的时间和其报废的寿命看作是内燃机耐久性的两个指标。

5.4 试验结果及分析

根据汽车内燃机可靠性试验结果，可以进行以下几个方面的评定与分析。

(1) 性能稳定性评价。依据内燃机实际运行持续时间(h)，运行过程中所更换的零部件

及其时间(h),进行发动机性能稳定性的评价。

(2) 性能变化趋势及数值。根据可靠性试验中各阶段性能试验的结果,绘制校正最大净扭矩、校正最大净功率、额定净功率、运行工况下全负荷最大活塞漏气量、24 h 平均机油/燃料消耗比与运行持续时间(h)的关系曲线,用以分析可靠性试验中性能变化的趋势,并按标准规定的限值进行评定。

(3) 零部件的损坏情况。由所记录的故障停车、紧固件松动、密封失效、橡胶件老化、堵塞、变形、裂纹、断裂、零部件损坏发生的运行时间(h)及维护作业情况,参照所提供的损坏部位、裂纹、断口和窜漏印迹等照片,以及试验前后主要零件变形量的精密测量数据来分别进行评定。

(4) 零部件磨损。依据机油油样分析结果,判断零部件磨损情况及机油品质;整理精密测量数据,确定主要摩擦副的磨损量;区分零部件磨损的形式,判定磨损的严重程度,提供磨损的照片,进行评定;描述摩擦副表面接触情况并提供照片,进行评定。

(5) 零部件表面沉积物。描述零部件表面沉积物的状态并提供照片,进行评定。

标准 GB/T 19055—2003《汽车发动机可靠性试验方法》对上述的评定依据均有说明。一般企业对新产品的可靠性试验的评价方法要严于行业标准,而行业标准又严于国家标准。如果有的企业在对内燃机进行热冲击试验时,试验时间根据不同试验对象有 100～1500 h,热冲击循环次数有 2000～10000 次。因此可以说,评价方法对内燃机的可靠性研究是非常重要的,同时内燃机整机可靠性试验结果对其零部件的改进具有重要的指导意义。

5.5　内燃机加速试验

目前,人们在研究和开发汽车动力时,为节约试验成本和时间,着力研究汽车动力加速试验的方法,也就是研究有哪些影响该动力可靠性和寿命的因素,可以在加速试验中适当地被加强而激发故障的提前发生,从而获得那些限制汽车动力可靠性和耐久性* 的特征的早期信息,这样就可以及早采取措施来改进设计。目前所执行的可靠性试验规范,都不同程度地反映了相关加速试验的结果。文献[3]对加速试验的基本概念及方法进行了介绍。目前,有很多企业在研制新产品的同时,还研究快速评价产品可靠性及耐久性试验的方法。如作者所在单位一直在探索、研究车用新能源动力系统中的燃料电池系统及动力电池寿命的快速评价方法。进一步信息读者可参考文献[3-9]等。下面介绍几个已公开发表的典型例子。

1. 航空发动机

航空发动机对长寿命、高可靠性的产品常采用加速试车(加速寿命试验)的方法来进行

---

* 汽车动力耐久性指标通常以寿命来表示,是指汽车动力从开始使用到第一次大修期前累计运转的小时数。

寿命试验。其目的是用强化应力的方法加速构件失效、缩短试验时间，降低试验成本，以便在较短时间内预测出构件在正常应力作用下的寿命特征；同时还可用作构件和材料筛选、确定产品的安全余量等的依据。详见参考文献[4]。

图 5-4 为某航空发动机的加速任务试车循环和正常使用循环的对比。一个试车循环的使用时间为 40 min，用以模拟典型航线的 120 min 飞行循环，使典型航线使用循环的时间缩短了 67%。由图看出，使试验循环集中经受最恶劣的瞬变循环条件是加速任务试车的较好方法。汽车能源动力进行寿命试验时，大多数也采用类似方法。

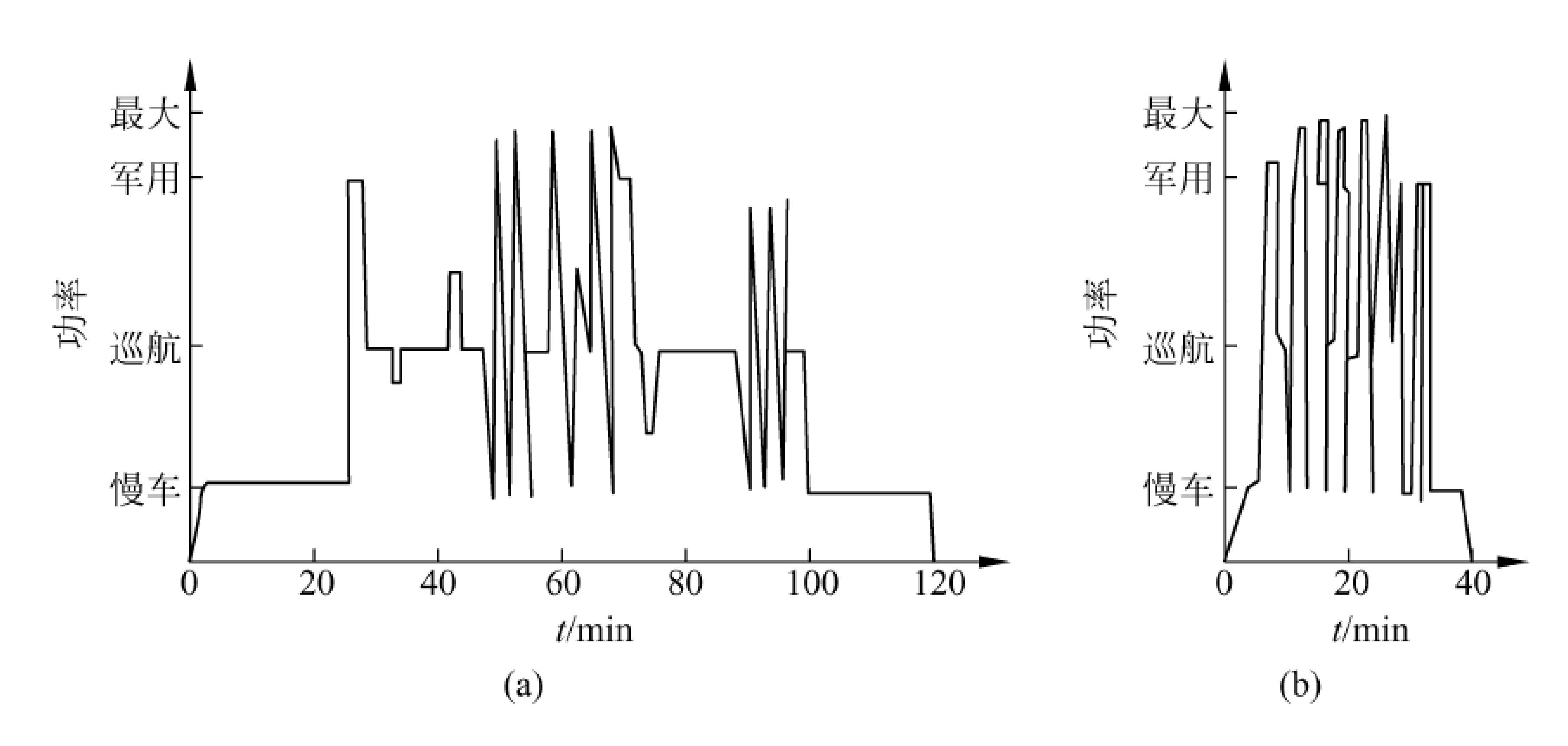


图 5-4 某航空发动机的加速任务试车循环

(a) 正常使用循环；(b) 加速任务试车循环

2. 车用催化剂

对车用催化剂的耐久性评价，一般也采用快速评价方法，即快速老化方法。该老化试验方法是基于催化器的失活机理和汽车行驶工况特点制定的。这种试验方法有很多种，其中断油老化循环方法是目前国内对汽油机排气催化转化器产品认定技术条件中规定的唯一的快速老化试验方法。该方法是基于催化剂高温氧化的失活机理。老化循环如图 5-5 所示。采用这种快速老化方法后，在催化剂入口温度为 760℃以及空速 SV＝60000 h^{-1} 的条件下运转 100 h，相当于 8000 km 的道路行驶。其中空速(space velocity，SV)定义为：每小时流过催化剂的排气体积流量与催化剂容积之比。

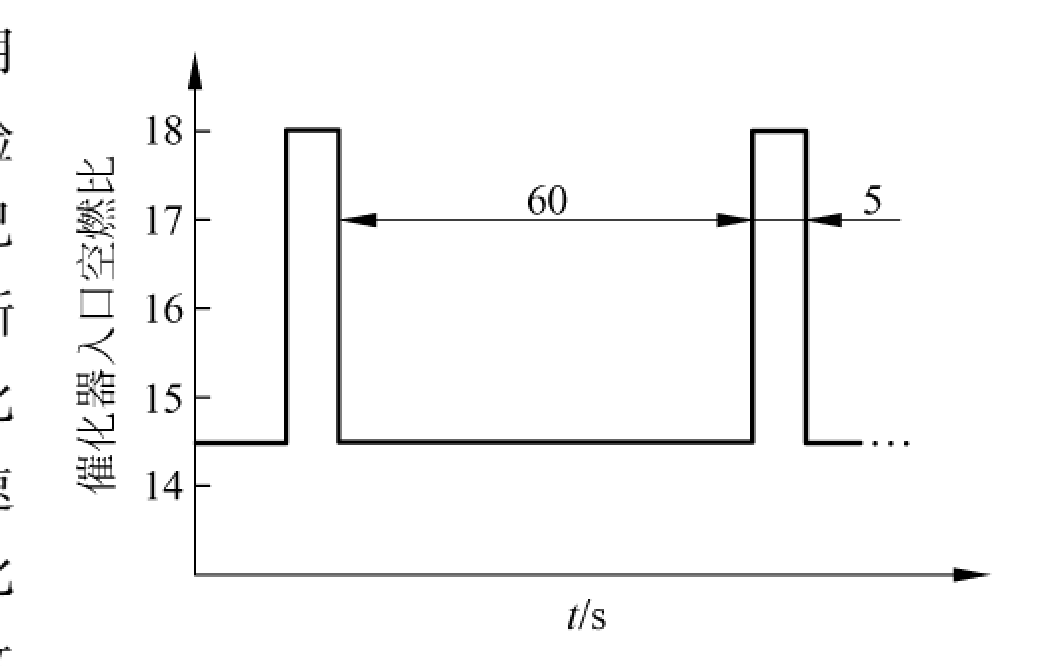


图 5-5 断油老化循环的空燃比控制

本章以国家标准 GB/T 19055—2003《汽车发动机可靠性试验方法》为背景介绍了有关

内燃机可靠性试验方法，同时拓展了加速试验内容的介绍。随着产品技术的不断提升，产品可靠性技术也发生了很大变化，有关可靠性试验分类、工作项目等相关书籍均有论述，如文献[8]对可靠性试验工作项目分为 6 项：①环境应力筛选；②可靠性研制试验；③可靠性增长试验；④可靠性鉴定试验；⑤可靠性验收试验；⑥寿命试验。进一步信息读者可参阅相关书籍和文献。

参考文献

[1] 李伟，夏爱国，何竣．发动机研制中可靠性工作的总体思路和方法研究[J]．航空工程进展，2012(2)：88-91.

[2] 方达淳，吴新潮，饶如麟，等．论"汽车发动机可靠性试验方法"[J]．汽车科技，2002(2)：19-22.

[3] [英]奥·康纳．试验工程：成本有效的设计、研制和制造指南[M]．李金国，等译．北京：电子工业出版社，2005.

[4] 张宝诚．航空发动机试验和测试技术[M]．北京：北京航空航天大学出版社，2005.

[5] 吕明春，陈循，张春华．关于加速可靠性试验技术的探讨[J]．质量与可靠性，2007(4)：20-23.

[6] PEI P C，CHANG Q F，TANG T. A Quick Evaluating Method for Automotive Fuel Cell Lifetime[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2008，33(14)：3829-3836.

[7] 郝佳胜．发动机耐久性试验研究与分析[J]．内燃机与动力装置，2012(5)：49-51.

[8] 胡湘洪，高军，李劲．可靠性试验[M]．北京：电子工业出版社，2015.

[9] [俄]凯耶斯．加速可靠性和耐久性试验技术[M]．宋太亮，方颖，丁利平，等译．北京：国防工业出版社，2015.

第6章 内燃机排放试验

6.1 概　　述

控制汽车排气污染、保护环境是目前世界各国政府都十分重视的一项工作。随着人们对汽车废气排放的要求日趋严格，世界上许多国家都颁布了汽车废气排放法规，对汽车排气污染物及测量方法均有严格的规定。美国是最早制定汽车排放法规的国家，这是因为20世纪40年代美国加州发生了光化学烟雾事件，经过研究发现罪魁祸首正是汽车尾气，于是加州政府在20世纪60年代首先制定了汽车排放法规，开创了汽车排放控制的先河，随后各国政府也先后制定了相应的汽车排放法规，并且越来越严格。排放标准的加强，促进了内燃机技术的进步与发展，也促进了汽车排放控制技术的进步和汽车排放测试技术的提高。

在中国，随着汽车保有量的迅速增加，汽车排气污染也越来越严重，北京、上海等大城市尤为突出。针对汽车排气污染现状，中国政府借鉴国外治理汽车尾气的成功经验，并结合中国汽车工业现状，制定了一系列汽车废气排放法规来控制汽车排气污染，如GB 18352.3—2013《轻型汽车污染物排放限值及测量方法（中国第五阶段）》（2018年1月1日起正式实施）和GB 17691—2018《重型柴油车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）》（2018年6月22日发布，2019年7月1日起开始实施）。

排放法规是由政府主管部门委托有实力的科研机构研究提出方案，并与所涉及的各部门讨论协商，最后由政府主管部门决定、公布并监督实施的。我国基本等效采用欧共体的排放法规，主要区别是在限值和实施的时间上作适当的调整。

对于车用燃油内燃机，排气污染物主要包括气态污染物和颗粒物。气态污染物指一氧化碳（CO）、碳氢化合物（HC）、氮氧化物（NO_x）、二氧化碳（CO_2）。颗粒物（PM）则由干炭烟（DS）、硫酸盐和可溶性有机物（SOF）组成。这些污染物主要存在以下三个来源：

（1）内燃机排气管排出的有害气体，如一氧化碳（CO）、二氧化碳（CO_2）、碳氢化合物（HC）、氮氧化物（NO_x）、颗粒物（PM）（主要来自柴油机和缸内直喷汽油机）等；

（2）内燃机曲轴箱内泄漏到大气中的废气污染物，如 CO、HC、NO_x；

（3）来自燃料供给系统的燃油蒸发排放物，主要是 HC。

汽车排放法规可分为轻型车排放法规和重型车排放法规，从表 6-1 可看出轻型车与重型车的划分方法。

表 6-1　轻型车与重型车的划分方法

种类	中国	欧盟	美国	日本
轻型车	总质量≤3500 kg 的货车、9 座以下的客车		总质量≤8500lb	总质量≤3500 kg 的货车（2005）
重型车	总质量＞3500 kg 的货车、9 座以上的客车		总质量＞8500lb	总质量＞3500 kg 的货车（2005）

注：1lb＝0.454 kg。

汽车内燃机排放法规又可分为道路车辆用内燃机排放法规和非道路车辆用内燃机排放法规。

非道路车辆排放法规按 ISO 1878 和 ISO 16183 的规定，它包括了拖拉机、工程车、园艺内燃机、发电机组、船舶内燃机等。

道路车辆排放法规目前在全世界主要分为三大体系，即美国排放法规（EPA）、欧盟排放法规（ECE）和日本排放法规（JES），其他各国基本上是按照或参考这三大体系来制定本国的排放法规。

6.2　各国排放法规

6.2.1　排放污染物的评定指标

对于污染物的排放量有三种评定指标，如表 6-2 所示，即浓度排放量、质量排放量和比排放量，分别用于不同场合。

表 6-2　污染物排放量评定指标

评定指标	定　　义	单　　位
浓度排放量	体积分数	%、10^{-6}、10^{-9}
	质量浓度	mg/m^3
质量排放量	单位时间质量排放量	g/h
	单位测试循环质量排放量	g/循环
比排放量	单位功率小时排放量	g/(kW·h)
	单位运转里程排放量	g/km

1. 浓度排放量

浓度排放量有两种评定指标，即体积分数和质量浓度。内燃机排气中，污染物所占的体积比称为该污染物的排放浓度或体积分数，根据实际浓度的不同，可分别用%、10^{-6}、10^{-9}来

表示。例如，排气中浓度较高的 CO 和 CO_2 等一般用%表示，而浓度低几个数量级的 HC、NO_x 等用 10^{-6} 表示，更低的成分还可以用 10^{-9} 表示。质量浓度的定义为单位排气体积中污染物的质量，常用 mg/m^3 表示。

2. 质量排放量

在实际环境治理工作中，要对排放污染物进行总量检测，或是在车辆及内燃机排放测试中要测定按规定的工况运转一次的排放量，这时可用每小时的质量排放量(g/h)或每一循环测试的质量排放量(g/循环)来表示。

3. 比排放量

当进行内燃机排放特性试验时，可以用每小时单位功率所排放的污染物质量(g/(kW·h))作为评价指标，即比排放量，一般以 G 表示。通常仪器给出的是浓度排放量，则转换关系为

$$G=\frac{\text{浓度排放量}\times\text{排气流量}(m^3/h)\times\text{排气密度}(g/m^3)}{\text{有效功率}(kW)} \tag{6-1}$$

整车测试中，用单位测试循环的质量排放量(g/循环)除以每测试循环的运转里程可得到单位运转里程排放量(g/km)，这是排放法规中最常见的比排放量量纲。

6.2.2 美国法规

美国是世界上最早执行排放法规的国家，也是排放控制指标种类最多，排放法规最严格的国家。美国的汽车排放法规分为联邦排放法规即环境保护局(EPA)排放法规和加利福尼亚州大气资源局(CARB)排放法规。美国加州是最早感受汽车污染物威胁(1940 年的光化学毒雾事件)因而也是最早立法控制排放污染物的地区。从而使它成为美国排放法规的先导者，联邦排放法规落后加利福尼亚州排放法规 1～2 年。

美国加州 1960 年立法控制汽车排气污染物；1963 年美国政府颁布《大气净化法》，当年加州就已开始控制曲轴箱燃油蒸发物排放；1966 年加州颁布实施“7 工况法”汽车排放法规；1968 年美国政府采用“7 工况法”控制汽车排放；1970 年加州开始控制轿车燃油蒸发物排放。美国政府从 1970 年开始制定一系列车辆排放控制法规，1972 年采用 LA-4C(FTP-72)测试循环，并增加对 NO_x 的控制，1975 年改用 LA-4CH(FTP-75)测试循环；1975 年起到 20 世纪 80 年代，美国排放法规大幅度加严，特别强化了对 NO_x 的限值，同时提高对非甲烷气体(NMOG)和 CO 的控制。1990 年美国国会对《大气净化法》做了重大修订，对汽车排放提出了更高的要求。1994 年加利福尼亚州制定的低污染汽车排放法规，将轻型车分为过渡低排放车(TLEV)、低排放车(LEV)、超低排放车(ULEV)和零排放车(ZEV)，并且规定从 1998 年起销售到加州的轻型车应有 2%为无污染排放(零排放)车，2001 年为 5%，2003 年达到 10%。同时在 2004 年进一步强化汽车排放法规推出超极低排放车辆(SULEV)限值，限值为 ULEV 的 1/4。

加利福尼亚州大气资源局(CARB)的排放法规是世界上最严格的汽车排放法规,也是最早体现将燃油和汽车看作统一体,要求炼油工业和汽车工业共同努力才能达标。2015—2025 年,加州开始分阶段施行最严的 LEV Ⅲ加州排放标准,其中所包含的 FTP-75 测试循环如图 6-1 所示。加州 LEV Ⅲ标准排放限值的类别有三类:分别是 LEV(低排放车辆)、ULEV(超低排放车辆)、SULEV(超极低排放车辆)。其中乘用车或者质量小于 8500 lb 的轻型卡车的排放限值要求见表 6-3,在以上三大类的基础上又分为 6 小类(如 ULEV70 表示该排放类别中 $NMOG+NO_x$ 排放的限值为 70 mg/mile=44 mg/km)。测试车辆要求在(25±5)℃环境温度下浸车 6 h 以上,测试时连续运行冷起动工况循环(高速或郊区工况循环)1 次和稳态工况循环(城区工况循环)1 次,然后停车(发动机熄火)10 min,再运行热起动工况循环(高速或郊区工况循环)1 次后结束测试。

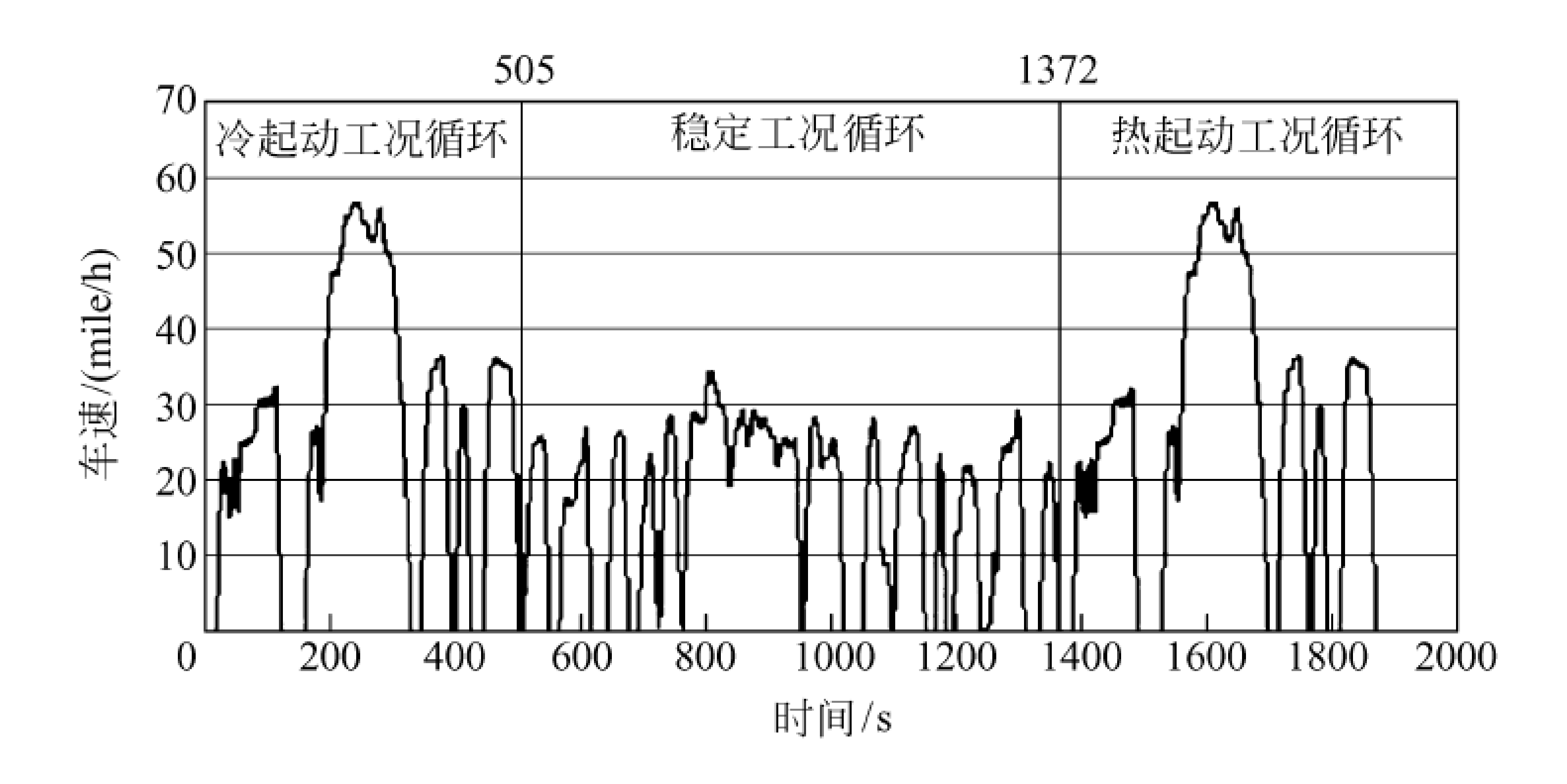


图 6-1　FTP-75 测试循环

表 6-3　美国加利福尼亚州 LEV III 排放标准限值(乘用车、<8500 磅的轻型卡车)

排放类别	$NMOG+NO_x$/(mg/mile)	CO/(g/mile)	HCHO/(mg/mile)	PM/(mg/mile)
LEV160	160	4.2	4	10
ULEV125	125	2.1	4	10
ULEV70	70	1.7	4	10
ULEV50	50	1.7	4	10
SULEV30	30	1.0	4	10
SULEV20	20	1.0	4	10
耐久里程	150 000 mile(240 000 km)			

1 mile=1.6 km;NMOG—非甲烷有机气体;HCHO—甲醛;LEV—低排放车;ULEV—超低排放车;SULEV—超极低排放车。

6.2.3 日本法规

日本是世界上第 2 大汽车生产国，从 1966 年起开始控制汽车排放污染，对新车进行 4 工况检测，规定控制 CO 体积分数小于 3%，1969 年加严到 2.5%；1971 年规定小型车 CO 体积分数小于 1.5%，轻型车 CO 体积分数小于 3%；1973 年采用 10 工况法，增加 THC 和 NO_x 作为排放控制指标；1986 年对柴油轿车排放进行控制，对在用车实施定期车检法规；1991 年起新车采用 10-15 工况测试循环，如图 6-2 所示。柴油乘用车的排放标准限值如表 6-4 所示；1993 年开始对所有柴油车排放进行控制。日本汽车排放法规限值有最高值和平均值两种：每一辆车的排放量不得超过最高值；平均值指每一季度测得的各辆车的平均值不得超过排放法规规定的平均值限值。

10-15 工况测试循环要求测试车辆在底盘测功机上进行预热，以恒速(60±2)km/h 运行 15 min，停机测量冷却液和润滑油温度后，再运行 5 min 及 15 工况循环 1 次和怠速 24 s，然后测试时连续运行 10 工况循环 3 次和 15 工况循环 1 次后结束测试。

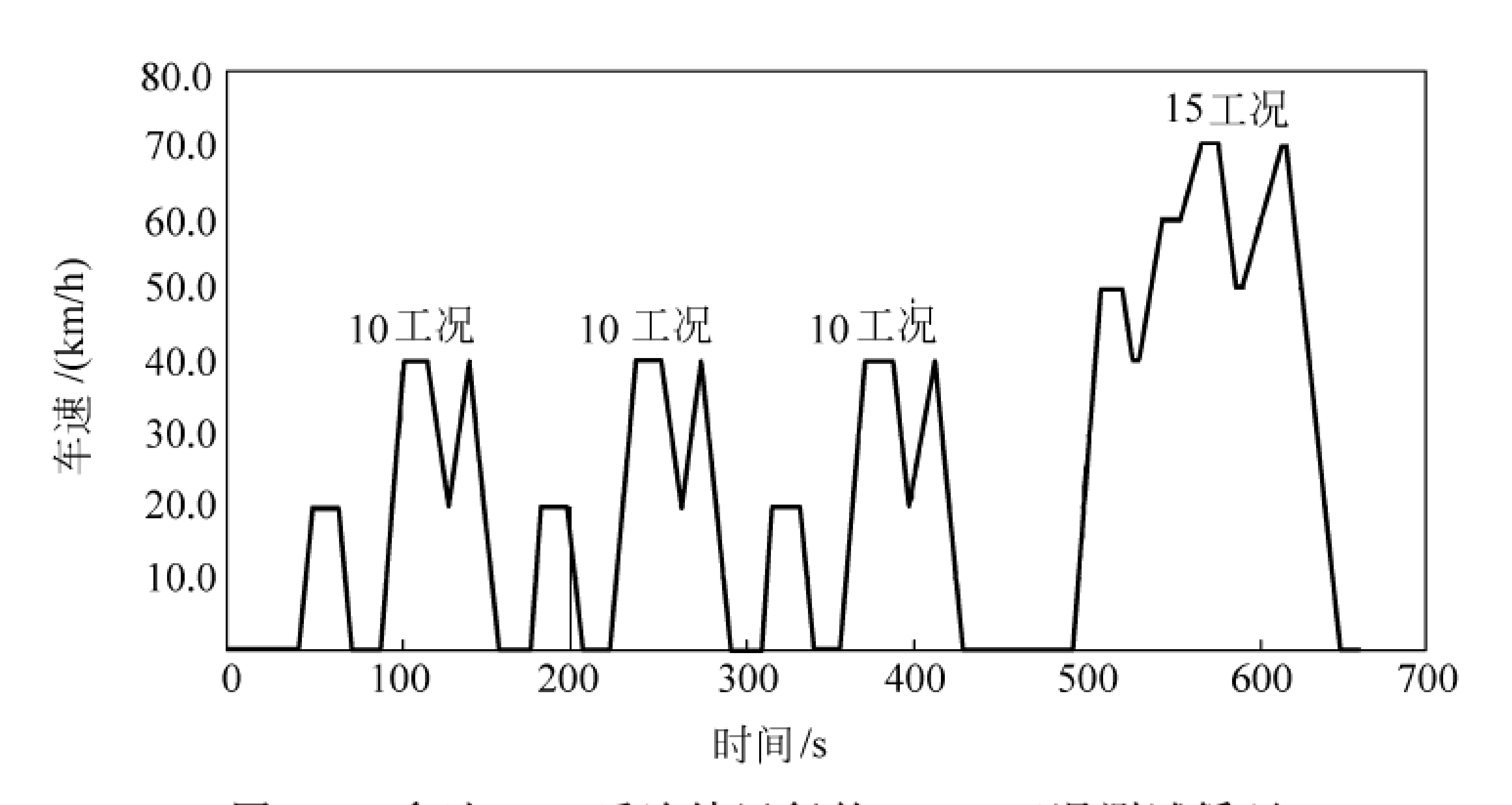


图 6-2 怠速 24 s 后连续运行的 10-15 工况测试循环

表 6-4 日本柴油乘用车排放标准限值 g/km

当量惯量/(kg)	CO	THC	NO_x	PM	测试工况	日期
<1250	0.63	0.12	0.28	0.052	10～15	2002
	0.63	0.024[a]	0.14	0.013	新工况	2005
>1250	0.63	0.12	0.30	0.056	10～15	2002
	0.63	0.024[a]	0.15	0.014	新工况	2005

注：a—非甲烷气体。

6.2.4 欧洲法规

欧洲经济委员会(ECE)从 1960 年颁布实施了第 1 项 ECE 法规，至今已形成 100 多项涵盖安全、环保、节能 3 大领域的汽车排放法规体系。

欧洲经济委员会从 1970 年开始以 ECE R15 法规的形式对轻型汽油车排放污染物和曲轴箱污染物排放进行控制，以后每隔 3～4 年修订加严一次，形成了 ECE R15-01(1975)、ECE R15-02(1977)、ECE R15-03(1979)系列排放法规。在 1975 年前执行的 ECE R15 和 ECE R15-01 法规只限制 CO 和 THC 的排放量，从 1977 年的 ECE R15-02 法规开始增加了对 NO_x 的限值要求。

为控制 NO_x 的排放，1982—1985 年实施的 ECE R15-04 法规将 THC 和 NO_x 的总量作为一个限值来控制；从 1988 年起排放法规细分为 ECE R83(88/76/EEC)和 ECE R15-04 两部分，其中 ECE R83 适用于最大总质量不大于 2500 kg 或定员 6 人以下的燃油(含铅汽油、无铅汽油、柴油)汽车，ECE R15-04 适用于最大总质量大于 2500 kg 而小于 3500 kg 的燃油汽车。为了达到 ECE R83 法规要求，1989 年起 ECE 开始使用无铅汽油。

ECE 在 1991 年对 ECE R83-00 法规进行了修改，制定了欧Ⅰ排放法规，从 1992 年开始实施，欧Ⅰ试验规范由内燃机起动后 40 s 加反复 4 次的 ECE-15 工况构成。考虑到道路交通情况的变化，及时修改了试验规范，欧Ⅱ试验规范在欧Ⅰ试验规范基础上加反映城郊高速公路的城郊工况 EUDC 构成(如图 6-3 所示)。1996 年起执行欧Ⅱ排放法规，排放法规限值已接近美国过渡低污染车(TLEV)的限值水平。欧Ⅱ法规中不仅在型式认证时对汽车排放限值加严，而且在生产一致性检查时排放限值与型式认证的限值相同。

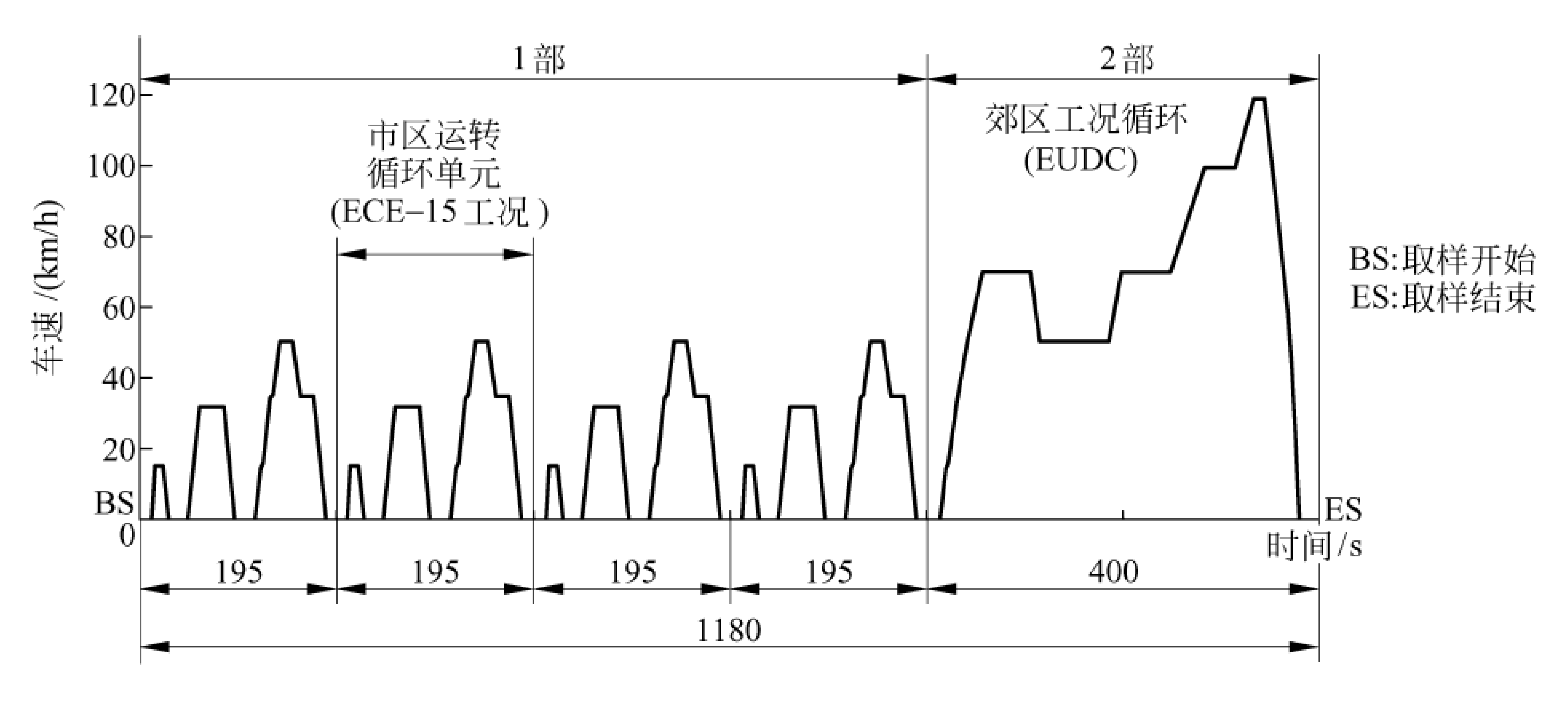


图 6-3　ECE-15＋EUDC(NEDC)循环

2000 年开始执行欧Ⅲ排放法规，对 THC 和 NO_x 分别给出限值，在欧Ⅱ基础上将其限值再降低 1/2，排气污染物测量方法分为Ⅰ型和Ⅵ型测试循环工况。

Ⅰ型为常温((25±5)℃)测试循环，如图 6-3 所示。要求排气采样与内燃机起动同时进行，加严了对 THC、CO 的限制。这是因为之前测试方法是在内燃机起动后 40 s 才开始采样，但大量研究结果表明，70％的 THC 都是在起动后 70 s 内生成的，因此需要排气采样与内燃机起动同时进行。

Ⅵ型为低温冷起动((－7±2)℃)测试循环，因欧Ⅱ试验规范中的Ⅰ型测试循环未考虑

低温冷起动时的污染物,这样会导致冷起动时的排放污染物(约有 30%)未能测到,因此欧Ⅲ排放法规增加了Ⅵ型测试循环,即增加了低温起动测试内容,即要求在低温((−7±2)℃)进行冷起动测试,测试循环为图 6-1 中第 1 部分,主要目标是限制 THC 和 CO。

欧Ⅲ排放法规还新增加车载诊断系统(on-board diagnostic system,OBD)功能检查、LPG/NG 汽车排放试验、8 万 km 内的在用车工况法排放一致性检查、替代用催化器的认证试验等项目,确保在用车排放量的持续达标要求。

2005 年开始执行欧Ⅳ排放法规。该法规在欧Ⅲ法规的基础上,无论汽油机还是柴油机,各项限值大都降低了一半,测试循环工况和方法同欧Ⅲ法规。

从表 6-5 和表 6-6 可看出点燃式内燃机和压燃式内燃机排放限值的变化。

表 6-5 点燃式内燃机的欧洲排放限值变化(适用于乘用车) g/km

年 份	CO	HC+NO_x	HC	NO_x
1982	20.7	5.80		
1992(EU1)	2.72	0.97		
1996(EU2)	2.20	0.50		
2000(EU3)	2.30		0.20	0.15
2005(EU4)	1.00		0.10	0.08
2009.09—2014.09(EU5,EU6)	1.00	—	0.10	0.06

表 6-6 压燃式内燃机排放限值变化(适用于乘用车) g/km

年 份	CO	HC+NO_x	NO_x	PM
1995 年底前 (EU1)	2.72	1.36		0.196
1995—2000 年(EU2)	1.0	0.9		0.1
2000—2005 (EU3)	0.64	0.56	0.5	0.05
2005—2009.09 (EU4)	0.5	0.3	0.25	0.025
2009.09(EU5)	0.5	0.23	0.18	0.005*
2014.09(EU6)	0.5	0.17	0.08	0.005*

* EU5、EU6 除了对 PM 的排放量加严控制,同时增加了对颗粒物排放数量的限制,以防止未来由于严格的质量限制以及 PM 收集器滤过性能的问题导致的微粒尺寸变得更小而无法被测量到。

6.2.5 中国法规

中国机动车污染控制工作始于 1979 年《中华人民共和国环境保护法(试行)》颁布以后,1984 年 4 月 1 日起实施 GB 3842~3844—1983《四冲程汽油车怠速排放污染物、柴油车自由加速烟度、柴油车全负荷烟度等排放标准》。1989 年制定了参照 ECE 15-03 和 ECE 15-04

法规的 GB 11641～11642—1989《轻型汽车污染物排放标准》。1994 年 5 月起实施 GB 14761.1～14761.7—1993《7 项汽车排放标准》，对汽油车怠速污染物、柴油车自由加速烟度和全负荷烟度排放限值有所加严。由于世界 3 大排放标准体系中，欧洲法规在限制的松严程度等方面更适用于中国的实际情况，而且道路交通情况也与中国较一致，中国在充分吸取欧美的经验后，全面等效采用了欧盟(EU)指令、ECE 技术内容和部分前欧共体(EEC)法规，形成了中国排放法规体系。

1999 年国家颁布了 4 项国家标准，包括 GB 3847—1999《压燃式内燃机和装用压燃式内燃机的车辆排气可见污染物限值及测试方法》、GB 14761—1999《汽车排放污染物限值及测试方法》、GB 17691—1999《压燃式内燃机和装用压燃式内燃机的车辆排气污染物限值及测试方法》和 GB/T 17692—1999《汽车用内燃机净功率测试方法》标准，制定中等效采用了欧洲排放法规。

1998 年国家实施的 GB 14761.1—1993 达到了 ECE 15—04 法规规定的限值。1999 年 1 月 1 日北京率先实施了相当于欧Ⅰ法规限值的 GB 11/105—1998《轻型汽车排气污染物排放标准》。2000 年 1 月 1 日在全国实施了相当于欧Ⅰ限值的 GB 14761—1999 标准。从 2000 年 1 月 1 日起还实施了 GB 17930—1999《车用无铅汽油》，为实施相当于欧洲Ⅰ号的国家标准创造了条件。GB 18352.2—2001《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(Ⅱ)》等效于欧Ⅱ的排放法规，于 2004 年 7 月 1 日起在全国实施。北京在 2005 年提前实施等效于欧Ⅲ的国家标准。

欧洲从 2000 年已开始实施更加严格的欧Ⅲ排放法规，2005 年进一步实施了欧Ⅳ排放法规。就柴油机而言，NO_x、THC、CO 及微粒物质等 4 种污染物的欧Ⅲ排放限值分别是欧Ⅱ的 63%、60%、64%和 50%，欧Ⅳ限值是欧Ⅲ的 50%、83%、78%和 50%，为缩短与国外的差距，中国于 2005 年 4 月又发布了多项新的排放标准，如 GB 18352.3—2005《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ阶段)》。Ⅲ、Ⅳ阶段指中国相当于实施欧Ⅲ、欧Ⅳ标准的阶段。该标准从 2007 年 7 月 1 日起实施。

2013 年 10 月 10 日经国务院批准并发布 GB 18352.5—2013《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第五阶段)》，实施时间为 2018 年 1 月 1 日；该标准规定从 2013 年 2 月 1 日起，北京作为国内首个具备国五标准燃油的城市，执行相当于“中国第五阶段”的“京五”机动车排放标准。3 月 1 日起停止销售注册不符合“京五”标准的轻型汽油车。

新标准与老标准相比，其主要变化如下：

(1) 加严了排放限值；

(2) 改变了试验规程；

(3) 增加了试验要求、试验内容等。

2005 年国家环境保护总局与国家质量监督检验检疫总局联合发布了系统的新的国家污染物排放标准。新的标准标志着对汽车污染物排放值实施了更为严格的控制，其主要内容见表 6-7。

表 6-7 现行国家汽车大气污染物排放标准一览表

序号	标准代号	标 准 名 称	注 释
1	GB 18352.5—2013	轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第五阶段)	代替 GB 18352.3—2005
2	GB 18352.3—2005	轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ阶段)	代替 GB 18352.2—2001
3	GB 11340—2005	装用点燃式内燃机重型汽车曲轴箱污染物排放限值及测量方法	代替 GB 11340—1989
4	GB 14763—2005	装用点燃式内燃机重型汽车燃油蒸发污染物排放限值及测量方法	代替 GB 14761.3—1993
5	GB 17691—2005	车用压燃式、气体燃料点燃式内燃机与汽车排气污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ阶段)	代替 GB 17691—2001 和 GB 14762—2002 中的气体燃料点燃式内燃机部分
6	GB 3847—2005	车用压燃式内燃机和压燃式内燃机汽车排气烟度排放限值及测量方法	代替 GB 11340—1989
7	GB 18285—2005	点燃式内燃机汽车排气污染物排放限值及测量方法(双怠速法及简易工况法)	代替 GB 14761.5—1993、GB/T 3845—1993 和 GB 18285—2000

表 6-8、表 6-9 列出了我国目前现行轻型车排放法规即 GB 18352.3—2013《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第五阶段)》的排放限值。表中Ⅰ型、Ⅵ型试验分别是指常温下冷起动(Ⅰ型试验)和低温下冷起动(Ⅵ型试验)后排气污染物排放试验。

表 6-8 现行国五轻型汽车Ⅰ型测试污染物限值

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="3"></th><th rowspan="3">基准质量(RM)/kg</th><th colspan="14">限 值</th></tr>
<tr><th colspan="2">CO</th><th colspan="2">THC</th><th colspan="2">NMTC</th><th colspan="2">NO_x</th><th colspan="2">THC+NO_x</th><th colspan="2">PM</th><th colspan="2">PN</th></tr>
<tr><th colspan="2">L1/(g/km)</th><th colspan="2">L2/(g/km)</th><th colspan="2">L3/(g/km)</th><th colspan="2">L4/(g/km)</th><th colspan="2">L2+L4/(g/km)</th><th colspan="2">L5/(g/km)</th><th colspan="2">L6/(个/km)</th></tr>
<tr><th>类别</th><th>级别</th><th></th><th>PI</th><th>CI</th><th>PI</th><th>CI</th><th>PI</th><th>CI</th><th>PI</th><th>CI</th><th>PI</th><th>CI</th><th>PI(1)</th><th>CI</th><th>PI</th><th>CI</th></tr>
<tr><td>第一类车</td><td>—</td><td>全部</td><td>1.00</td><td>0.50</td><td>0.100</td><td>—</td><td>0.068</td><td>—</td><td>0.060</td><td>0.180</td><td>—</td><td>0.230</td><td colspan="2" rowspan="4">0.0045</td><td>—</td><td rowspan="4">6.0×10^{11}</td></tr>
<tr><td rowspan="3">第二类车</td><td>Ⅰ</td><td>RM≤1305</td><td>1.00</td><td>0.50</td><td>0.100</td><td>—</td><td>0.068</td><td>—</td><td>0.060</td><td>0.180</td><td>—</td><td>0.230</td><td>—</td></tr>
<tr><td>Ⅱ</td><td>1305<RM≤1760</td><td>1.81</td><td>0.63</td><td>0.130</td><td>—</td><td>0.090</td><td>—</td><td>0.075</td><td>0.235</td><td>—</td><td>0.295</td><td>—</td></tr>
<tr><td>Ⅲ</td><td>1760<RM</td><td>2.27</td><td>0.74</td><td>0.160</td><td>—</td><td>0.108</td><td>—</td><td>0.082</td><td>0.280</td><td>—</td><td>0.350</td><td>—</td></tr>
</table>

注:PI=点燃式;CI=压燃式;(1)仅适用于装缸内直喷内燃机的汽车。

表 6-9　现行国五轻型汽车Ⅵ型测试污染物限值　g/km

试验温度 266K(−7℃)				
类别	级别	基准质量(RM)/(kg)	L_1CO	L_2THC
第一类车	—	全部	15.0	1.80
第二类车	Ⅰ	RM≤1305	15.0	1.80
	Ⅱ	1305<RM≤1760	24.0	2.70
	Ⅲ	1760<RM	30.0	3.20

注：该试验限值是指轻型汽车低温下冷起动后排气中CO和THC排放试验的限值。

2016年12月国家环境保护部、国家质检总局联合发布GB 18352.6—2016《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》,即轻型车"国六"标准,将于2020年7月1日起在全国范围内开始实施。该标准规定了装用点燃式和压燃式发动机的轻型汽车,在常温和低温下排气污染物、实际行驶排放污染物、曲轴箱污染物的排放限值及测量方法(对于点燃式发动机,还特别规定了蒸发污染物、加油过程污染物的排放限值),污染控制装置耐久性、车载诊断(OBD)系统的技术要求及测量方法(如表6-10所示)。

表 6-10　国六标准型式检验试验项目

型式检验试验类型	装用点燃式发动机的轻型汽车(包括HEV)			压燃式发动机(包括HEV)
	汽油车	两用燃料车	单一气体燃料	
Ⅰ型—气态污染	进行	进行	进行	进行
Ⅰ型—颗粒质量	进行	进行(只试验汽油)	不进行	进行
Ⅰ型—粒子数量	进行	进行(只试验汽油)	不进行	进行
Ⅱ型	进行	进行(只试验汽油)	进行	进行
Ⅲ型	进行	进行(只试验汽油)	进行	进行
Ⅳ型(1)	进行	进行(只试验汽油)	不进行	不进行
Ⅴ型(2)	进行	进行(只试验气体燃料)	进行	进行
Ⅵ型	进行	进行(只试验汽油)	进行	进行
Ⅶ型	进行	进行(只试验汽油)	不进行	不进行
OBD系统	进行	进行	进行	进行

(1) Ⅳ型试验前,还应按要求对炭罐进行检测;

(2) 对于使用规定的劣化系数(修正值)通过型式检验的车型,不进行此项试验。

注:Ⅰ型试验:常温下冷起动后排气污染物排放试验;
Ⅱ型试验:实际行驶污染物排放试验;
Ⅲ型试验:曲轴箱污染物排放试验;
Ⅳ型试验:蒸发污染物排放试验;
Ⅴ型实验:污染控制装置耐久性试验;
Ⅵ型试验:低温下冷起动后排气CO、THC和NO_x排放试验;
Ⅶ型试验:加油过程蒸发污染物排放试验。

与 GB 18352.5—2013《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第五阶段)》相比较，“国六”标准的主要变化有：

(1) 变更Ⅰ型试验(常温下冷起动后排气污染物排放试验)测试循环为 WLTC 循环，加严了污染物排放限值，增加了汽油车排放颗粒物数量(PN)测量要求；

(2) 将实际行驶污染物排放(RDE)试验定为Ⅱ型试验(实际行驶污染物排放试验)；

(3) 加严了Ⅵ型试验(蒸发污染物排放试验)项目和限值；

(4) 修订了对车载诊断系统的监测项目、阈值及监测条件等技术要求；

(5) 修订了获取汽车车载诊断系统和汽车维护修理信息的相关要求；

(6) 修订了生产一致性检查的判定方法和在用符合性检查的相关要求；

(7) 修订了试验用燃料的技术要求；

(8) 增加了加油过程污染物控制要求；

(9) 增加了混合动力电动汽车的试验要求。

根据要求，轻型车“国六”标准将分两阶段执行。自 2020 年 7 月 1 日起，所有销售和注册登记的轻型汽车应符合标准要求，其中Ⅰ型试验应符合 6a 限值要求(如表 6-11 所示)。自 2023 年 7 月 1 日起，所有销售和注册登记的轻型汽车应符合标准要求，其中Ⅰ型试验应符合 6b 限值要求(如表 6-12 所示)。

表 6-11 Ⅰ型试验污染物排放限值(国 6a)

车辆类别		测试质量(TM)/kg	限值						
			CO/(mg/km)	THC/(mg/km)	NMTC/(mg/km)	NO_x/(mg/km)	N_2O/(mg/km)	PM/(mg/km)	PN[(1)]/(个/km)
第一类车	—	全部	700	100	68	60	20	4.5	6.0×10^{11}
第二类车	Ⅰ	TM≤1305	700	100	68	60	20	4.5	6.0×10^{11}
	Ⅱ	1305<TM≤1760	880	130	90	75	25	4.5	6.0×10^{11}
	Ⅲ	1760<TM	1000	160	108	82	30	4.5	6.0×10^{11}

(1) 2020 年 7 月 1 日前，汽油车适用 6.0×10^{12} 个/km 的过渡限值。

表 6-12 Ⅰ型试验污染物排放限值(国 6b)

车辆类别		测试质量(TM)/kg	限值						
			CO/(mg/km)	THC/(mg/km)	NMTC/(mg/km)	NO_x/(mg/km)	N_2O/(mg/km)	PM/(mg/km)	PN[(1)]/(个/km)
第一类车	—	全部	500	50	35	35	20	3.0	6.0×10^{11}
第二类车	Ⅰ	TM≤1305	500	50	35	35	20	3.0	6.0×10^{11}
	Ⅱ	1305<TM≤1760	630	65	45	45	25	3.0	6.0×10^{11}
	Ⅲ	1760<TM	740	80	55	50	30	3.0	6.0×10^{11}

(1) 2020 年 7 月 1 日前，汽油车适用 6.0×10^{12} 个/km 的过渡限值。

根据法规要求，增加的Ⅱ型试验实际行驶污染物排放(RDE)，其市区行程和总行程污染物排放均不得超过表 6-12(6b)中规定的Ⅰ型试验排放限值与表 6-13 中规定的符合性因子的乘积，且计算过程不能采用四舍五入。

表 6-13　Ⅱ型 RDE 试验符合性因子(1)

类别	NO_x	PN	CO(3)
点燃式	2.1(2)	2.1(2)	/
压燃式	2.1(2)	2.1(2)	/

(1) 2023 年 7 月 1 日前仅检测并报告结果。
(2) 2022 年 7 月 1 日前评估确认。
(3) 在 RDE 测试中，应测量并记录 CO 试验结果。

重型车排放法规按照 GB 17691—2005 测试，其限值在 6.3.6 节中介绍。

6.3　中国排放测量方法

6.3.1　轻型汽车排气污染物测试方法

关于中国轻型车排气污染物测试方法，国家现行标准 GB 18352.3—2013《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第五阶段)》(2018 年 1 月 1 日开始全面实施)中有详细的规定，如标准中规定燃用汽油的装用点燃式发动机的汽车(包括两用燃料车)必须进行下述试验：

(1) Ⅰ型试验——常温下冷起动后排气污染物排放试验(颗粒物质量测量仅适用于装缸内直喷发动机的汽油车，且汽油车不进行颗粒物数量测量)；

(2) Ⅱ型试验——双怠速试验或自由加速烟度试验(汽油车仅进行双怠速试验，两用燃料车需试验两种燃料)；

(3) Ⅲ型试验——曲轴箱污染物排放试验(两用燃料车只试验汽油)；

(4) Ⅳ型试验——蒸发污染物排放试验(两用燃料车只试验汽油)；

(5) Ⅴ型试验——污染控制装置耐久性试验(两用燃料车只试验汽油)；

(6) Ⅵ型试验——低温下冷起动后排气中 CO 和 THC 排放试验(两用燃料车只试验汽油)；

(7) 车载诊断(OBD)系统试验。

1. 测试装置

测量轻型汽车排气污染物所采用的试验装置主要由底盘测功机、定容采样(constant volume sampling，CVS)系统、分析设备和控制系统等组成，其结构示意图如图 6-4 所示。

图 6-4 中所示的底盘测功机主要用于模拟汽车在道路上运行时所受到的滚动阻力、空气阻力、坡度阻力以及加减速时的惯性力。它一般装有惯量模拟器和功率吸收装置(PAU)。下面对试验装置中的定容采样系统和分析设备进行介绍。

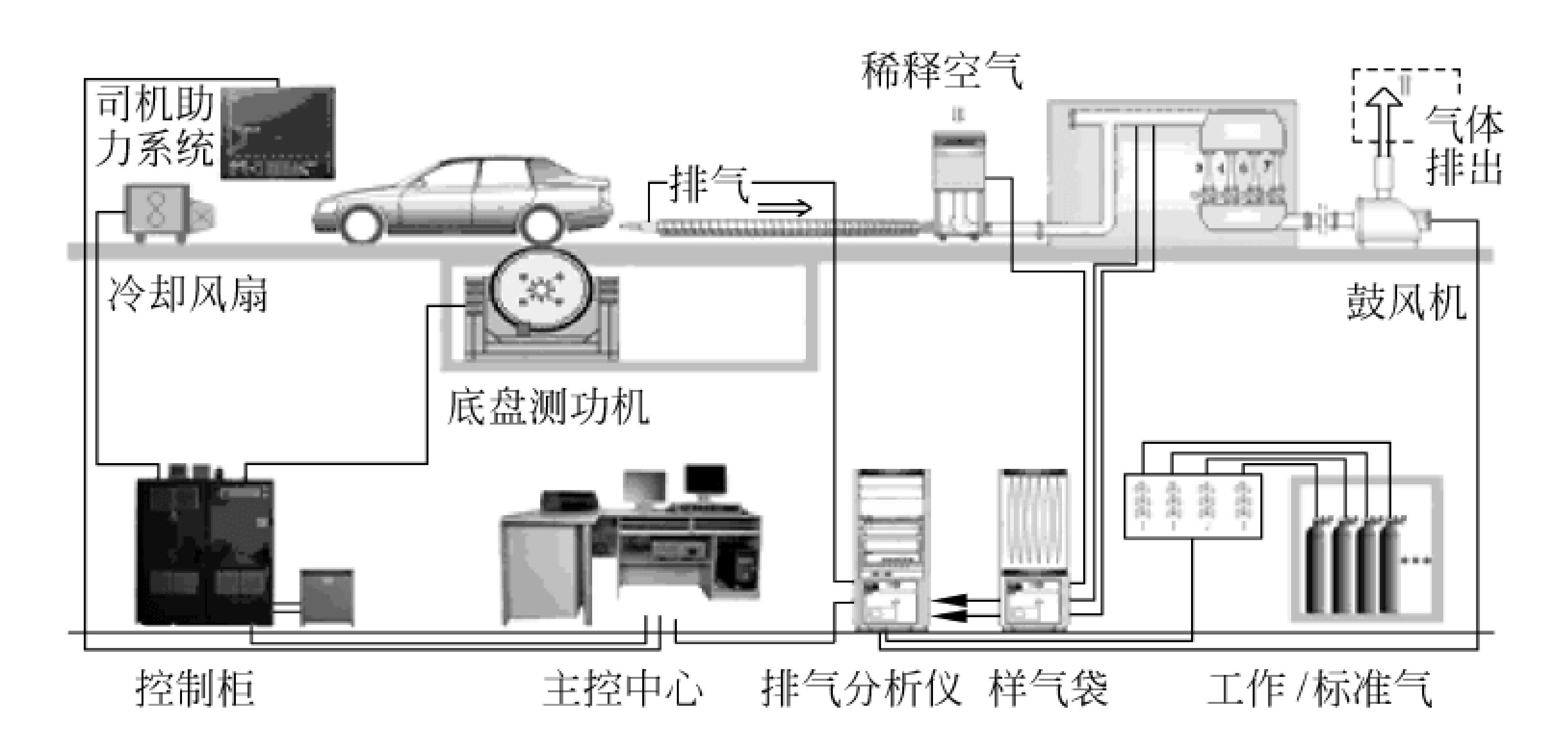


图 6-4 轻型汽车排气污染物试验装置

1）定容采样系统

定容采样系统主要是将车辆在底盘测功机上运行时的排气用标准的空气连续稀释（通常是被测内燃机最大排气量的 10～20 倍），然后通过定流量装置把稀释排气按一定的流量排出，同时按一定比例连续收集该稀释排气到取样气袋中等待分析。定容采样（CFV-CVS）系统主要由临界流量文氏管（CFV）、排放气体稀释混合箱、样气储存袋、鼓风机、计算机测量控制系统等组成，如图 6-5 所示。

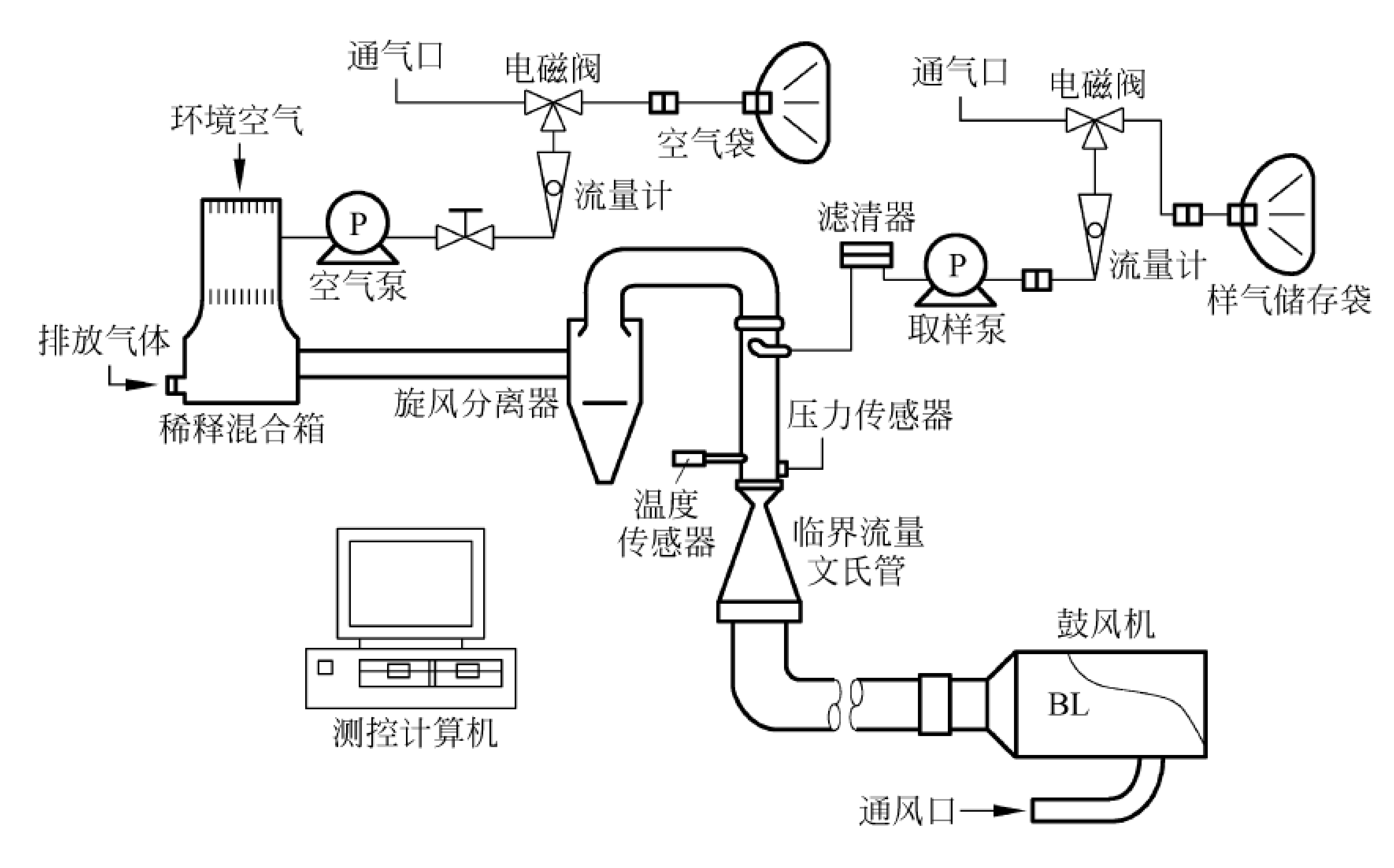


图 6-5 定容采样（CFV-CVS）系统

20 世纪 70 年代后美国已开始将定容采样（CVS）装置用于排放法规的检测。CVS 系统有时也称可变稀释采样器。常用的 CVS 系统有以下两种：

① 带容积泵的变稀释度装置（positive displacement pump-CVS，PDP-CVS ）；

② 临界流量文氏管（文丘里管）变稀释度装置（critical flower venturi-CVS，CFV-CVS） 。

PDP-CVS 是过去常用的一种系统，它是用一个定向位移泵来保持整个流量的恒定。即通过容积泵的定温、定压使气体达到标准要求，然后利用容积泵的每转容积和泵的转数来确定总容积。这种定容采样的优点是稀释比可变，因此 CVS 与内燃机的排量匹配比较合理；其缺点是结构复杂，价格昂贵，噪声大，维护困难。

CFV-CVS 是用临界流量文氏管来保持整个流量恒定。它的缺点是一经设定，流量变化量范围较小，一般只设几个档次。但它具有结构简单、价格低廉、维护方便等优点，所以近年来获得广泛应用。

2）分析设备

分析设备用来对定容采样器取样气袋中的稀释气体进行成分分析。因此，要求分析设备具有较高的灵敏度和良好的选择性，测量范围适中，精度高，反应快，读数稳定以及受干扰小等特性。目前国内外均采用下述分析设备：

（1）一氧化碳（CO）和二氧化碳（CO_2）采用不分光红外线吸收型（NDIR）分析仪；

（2）总碳氢化合物（THC）采用氢火焰离子化型分析仪（FID），对压燃式内燃机采用加热式氢火焰离子化型分析仪（HFID）；

（3）氮氧化物（NO_x）采用化学发光型分析仪（CLD）；

（4）内燃机排气中微粒物（PM）采取在稀释风道尾部取样的方式，用滤纸收集，用精密天平称重。

2．检测方法

汽车排放污染物检测，从测试内容划分，主要有怠速法和工况法两种。怠速法是测量汽车在怠速工况下排气污染物的一种测量方法，一般仅测 CO 和 HC（正己烷当量），测量仪器采用便携式排放分析仪。这种方法具有简便易行、测试装置价格便宜、便于携带以及检测时间短等优点，但测量结果不能全面反映汽车排放状况，测量有偏差，如 HC 不是总碳氢化合物。然而，怠速法可作为环保部门检测在用车的排放，以及汽车修理厂对车辆的排放性能和内燃机是否正常工作进行简易评价的方法。

工况法是各国或各地区为控制大气污染，对各自城市的市区和郊区交通状况进行调查和统计处理后，归纳出一系列典型行驶工况，组成测试循环，再进行检测的一种通用的方法。目前世界上已形成了欧洲、美国和日本为代表的 3 大轻型汽车排放法规体系，各体系有各自的工况循环。其他各国基本上是在参照美国和欧洲法规的基础上制定本国的排放法规。

工况法检测结果可以比较全面地反映汽车在使用状态下的排放水平，目前中国一般用于新车的认证许可检测和出厂抽查检测，因其设备昂贵，因此未用于对在用车的检测。

中国轻型车排放法规的测试循环与欧洲法规循环相同，如图 6-3 所示。

3．数据处理

标准污染物排放量按下式进行计算：

$$M_i = \frac{V_{mix} \times Q_i \times K_H \times C_i \times 10^{-6}}{d} \tag{6-2}$$

式中：M_i——污染物 i 的排放质量，g/km；

V_{mix}——稀释排气的容积(校正至标准状态 273.2 K 和 101.33 kPa)，L/试验；

Q_i——在标准温度和压力(273.2 K 和 101.33 kPa)下污染物 i 的密度，g/L；

K_H——用于计算氮氧化物的排放质量的湿度校正系数(对于 HC 和 CO 没有湿度校正)；

C_i——稀释排气中污染物 i 的浓度，并用稀释空气中所含污染物 i 的浓度进行修正，10^{-6}；

d ——相当于测试循环的实际距离，km。

进一步信息及详细计算参见当下的标准。

6.3.2 重型车用汽油机排气污染物检测方法

对于重型汽车的排放试验，根据标准只需进行对应整车的同型号内燃机的台架排放测试即可。其测试系统一般是在内燃机台架测试系统基础上增加排放分析系统，同时在中央测控系统中增加与排放分析系统的接口，以便信号接收和处理。

标准(GB 14762—2008)规定了重型车用汽油机与汽车排气污染物排放限值及测量方法、车载诊断(OBD)系统的技术要求及试验方法。该标准适用于设计车速大于 25 km/h 的 M_2、M_3、N_2 和 N_3 类及总质量大于 3500 kg 的 M_1 类机动车装用的汽油机及其车辆的型式核准、生产一致性检查和在用车/内燃机符合性检查。

标准(GB 14762—2008)是对 GB 14762—2002 的修订，与 GB 14762—2002 相比主要变化如下：

(1) 提高了排气污染物的排放控制要求；

(2) 调整了标准体系，将装用以天然气或液化石油气作为燃料的点燃式内燃机汽车及其点燃式内燃机的气态污染物的排放限值及测量方法纳入其他相关排放标准；

(3) 改变了测量方法，试验工况由重型汽油机瞬态循环所构成；

(4) 从第Ⅲ阶段开始，增加了车载诊断(OBD)系统的要求；

(5) 从第Ⅲ阶段开始，增加了排放控制装置的耐久性要求；

(6) 从第Ⅳ段开始，增加了在用车/内燃机的符合性要求；

(7) 增加了新型内燃机和新型汽车的型式核准规程；

(8) 改进了生产一致性检查及其判定方法。

重型汽油机瞬态循环由 1830 个逐秒变换工况组成，表 6-14 列举了开始和结束时部分瞬态循环工况，详细内容需参见 GB 14762—2008 中的附件 BA、BB。该测试循环是采用附件 BB 内燃机归一化转速-时间和扭矩-时间数据，按照标准的附件 BA 规定的方法转换而成的试验内燃机实际转速时间和扭矩时间序列。

附录 A 试验 7 对排放测试过程进行了简要介绍，进一步信息需参考标准 GB 14762—2008，该标准对测量、取样规程、标定规程、分析和取样系统及计算等均有详细说明，测试前需仔细研读。

表 6-14　重型汽油机瞬态循环内燃机试验循环工况

时间/s	归一化转速/%	归一化扭矩/%	时间/s	归一化转速/%	归一化扭矩/%	时间/s	归一化转速/%	归一化扭矩/%
0	0	0	27	57.0	37.9	54	59.9	15.5
1	0	0	28	34.6	49.7	55	60.9	20.6
2	0	0	29	43.8	38.1	56	61.7	18.5
3	0	0	30	49.0	23.7	57	62.4	16.9
4	0	0	31	53.1	19.4	58	63.2	18.6
5	0	0	32	58.8	24.9	59	64.0	18.5
6	0	0	33	65.7	30.2	60	64.9	19.9
7	0	0	34	72.6	30.6	61	66.6	28.6
8	0	0	35	78.6	28.2	62	69.3	38.7
9	0	0	36	38.9	37.8	63	72.1	41.4
10	0	0	37	40.9	29.4	64	74.6	38.0
⋮								⋮
1760	61.7	5.4	1790	27.5	4.0	1820	44.5	“M”
1761	61.7	4.3	1791	26.8	1.6	1821	40.6	“M”
1762	59.2	“M”	1792	25.6	“M”	1822	37.5	“M”
1763	55.0	“M”	1793	26.2	5.9	1823	34.4	“M”
1764	52.3	“M”	1794	28.8	12.8	1824	31.6	“M”
1765	53.2	7.9	1795	31.8	15.0	1825	25.1	“M”
1766	56.7	17.1	1796	35.1	15.7	1826	15.0	“M”
1767	60.4	17.8	1797	37.6	13.2	1827	0	0
1768	63.8	17.3	1798	37.4	3.4	1828	0	0
1769	67.4	17.6	1799	35.2	“M”	1829	0	0

6.3.3　燃油蒸发排放物

燃油蒸发排放物是指除汽车排气管排放以外，从车辆的燃料（汽油）系统损失的碳氢化合物，主要包括：

（1）燃油箱呼吸损失（昼间换气损失），由于燃油箱内温度变化导致碳氢化合物的排出；

（2）热浸损失，在汽车行驶一段时间后，静置汽车的燃料系统排放的碳氢化合物。

目前世界各国对汽油车燃油蒸发污染物的测量方法有两种。一种是收集法，即将装有活性炭的收集器与汽油车供油系统和大气相通的部分连接进行测量，将规定时间内收集到的活性炭吸附的汽油质量作为计量的数据；另一种是密闭室法，是让汽车放在密闭室内，在规定时间内，测量密闭室的碳氢化合物浓度，再换算出燃油蒸发量。国家标准 GB 18352.3—

2005《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ阶段)》中的附录F“蒸发污染物排放测试(Ⅳ型测试)”中已对其试验方法作了详细规定。所有的汽油车都必须进行此项测试,按附录F进行测试时,每次测试的蒸发污染物排放量应小于2 g。

6.3.4 曲轴箱污染物

曲轴箱污染物是指从内燃机曲轴箱排放到大气中的气体污染物,主要包括:

(1) 从活塞和汽缸之间的间隙窜入曲轴箱的油气和已燃气体;

(2) 曲轴箱内的润滑油蒸气。

我国国家标准GB 18352.3—2005《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ阶段)》中的附录E“曲轴箱气体排放测试(Ⅲ型测试)”中已对其试验方法作了详细规定。

6.3.5 怠速排放

怠速工况时的污染物是指CO、HC的正己烷当量值,其测量方法详见国家标准GB 18285—2005《点燃式内燃机汽车排气污染物排放限值及测量方法(双怠速法及简易工况法)》。

《汽车工程手册——试验篇》《汽车排气污染物治理及催化转化器》等文献中对国内外排放法规及排放测试方法都有详细论述。

6.3.6 重型车用柴油机排气污染物检测方法

重型车用柴油机(总质量大于3500 kg的机动车)排放测试包括气态排放物和微粒物的测试。气态排放污染物指一氧化碳(CO)、总碳氢化合物(THC)和氮氧化物(NO_x);颗粒物(PM)指在温度不超过325 K(52℃)的稀释排气中,由规定的过滤介质上收集到的所有物质。对于重型车的排放检测只要求内燃机在内燃机试验台上按规定的测试程序进行。

目前重型车用柴油机排放测试标准为:

(1) GB 17691—2005《车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ阶段)》(国家标准)。2005-05-30发布,2007-01-01实施。本标准规定了装用压燃式内燃机汽车及其压燃式内燃机所排放的气态和颗粒污染物的排放限值及测试方法;以及装用以天然气(NG)或液化石油气(LPG)作为燃料的点燃式内燃机汽车及其点燃式内燃机所排放的气态污染物的排放限值及测量方法。

(2) DB 11/964—2013《车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物限值及测量方法(台架工况法)》(北京地区标准)。2013-02-20发布,2013-03-01实施。本标准规定了车用压燃式、气体燃料点燃式内燃机与汽车排气污染物的排放限值和实验室台架测量方法,以及环保核准要求、环保一致性的检查与判断方法。本标准是对GB 17691《车用压燃式、气体燃料点燃式内燃机与汽车排气污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ阶段)》及其修改方案的补充,主要增加了WHTC循环——世界统一的瞬态测试循环(world harmonized transient cycle,WHTC)。

环境保护部在2014年1月16日发布了《城市车辆用柴油机排气污染物排放限值及测

量方法(WHTC 工况法)》(HJ 689—2014),规定自 2015 年 1 月 1 日起在柴油机型式核准中增加新的测试循环——WHTC,此标准的发布代表着该测试循环在中国将被广泛地采用。

为保证测试结果的准确性和可比性,标准对测试条件、试验设备的要求、试验规程及测试数据的处理等均进行了详细的规定。本节分别对上述两个标准的测试规程和排放限值进行简要介绍。

1. GB 17691—2005 测试规程及排放限值

GB 17691—2005 规定测试由以下 3 个测试规程构成:

(1) ESC(稳态循环);

(2) ELR(负荷烟度试验);

(3) ETC(瞬态循环)。

上述 3 种测试应用于不同车种或不同控制阶段,其排放限值见表 6-15 和表 6-16。法规规定,当对传统柴油机按表 6-15 和表 6-16 中第Ⅲ阶段排放限值进行型式核准测试时,包括那些安装了燃油电喷系统、排气再循环(EGR)和氧化型催化器,或后二者只安装其一的柴油机,均应采用 ESC 和 ELR 测试规程测定其排气污染物。对于安装了先进的排气后处理装置包括 NO_x 催化器和颗粒物捕集器,或二者只安装其一的柴油机,应加 ETC 瞬态循环测试规程测定排气污染物,以检测排气后处理性能。

表 6-15　ESC 和 ELR 测试排放限值

阶段	CO /[g/(kW·h)]	HC /[g/(kW·h)]	NO_x /[g/(kW·h)]	PM /[g/(kW·h)]	烟度 /m^{-1}
Ⅲ	2.1	0.66	5.0	0.10,0.13(1)	0.8
Ⅳ	1.5	0.46	3.5	0.02	0.5
Ⅴ	1.5	0.46	2.0	0.02	0.5
EEV(2)	1.5	0.25	2.0	0.02	0.15

(1) 对每缸排量低于 0.75dm^3 及额定功率转速超过 3000 r/min 的内燃机。

(2) EEV 为环境友好车辆。

表 6-16　ETC 测试排放限值　g/(kW·h)

阶段	CO	NMHC(1)	CH_4(2)	NO_x	PM(3)
Ⅲ	5.45	0.78	1.6	5.0	0.16,0.21(4)
Ⅳ	4.0	0.55	1.1	3.5	0.03
Ⅴ	4.0	0.55	1.1	2.0	0.03
EEV(5)	3.0	0.40	0.65	2.0	0.02

(1) NMHC 为非甲烷碳氢化合物。

(2) 仅对 NG 内燃机。

(3) 不适用于第Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ阶段的燃气内燃机。

(4) 对每缸排量低于 0.75 dm^3 及额定功率转速超过 3000 r/min 的内燃机。

(5) EEV 为环境友好车辆。

对于表 6-15 和表 6-16 中Ⅳ、Ⅴ阶段或 EEV(环境友好车辆)的型式核准测试,应采用 ESC、ELR 和 ETC 试验规程测定其排放污染物。下面简要介绍上述 3 种试验规程。

1) ESC 测试循环(稳态循环)

内燃机在进行 ESC 试验时,是按图 6-6 列出的内燃机稳态的 13 工况循环进行的,故称内燃机稳态 13 工况测试。测试过程中必须按照每个工况所规定的时间(怠速工况为4 min,其他工况 2 min)运转,最初 20 s 用于完成转速和负荷的转换。每个工况中规定的转速应保持在±50 r/min 之内,规定的扭矩应保持在测试转速下最大扭矩的±2%以内。

综合图 6-6(a)、(b)可看出,图 6-6(b)横坐标以图 6-6(a)内燃机外特性线上 50%最大净功率 P_{max}时所对应的转速为 0 转速点(原点,0),以高于最大净功率转速 n_{ref}的区段中,功率降为 70% P_{max}的转速(高转速 n_{hi})为 100%转速点。测试工况点对应的 3 个转速 A、B、C 分别为此转速段内 25%、50%和 75%转速。计算公式为

$$\begin{cases} 转速\ A = n_{lo} + 25\%(n_{hi} - n_{lo}) \\ 转速\ B = n_{lo} + 50\%(n_{hi} - n_{lo}) \\ 转速\ C = n_{lo} + 75\%(n_{hi} - n_{lo}) \end{cases} \tag{6-3}$$

排气污染物测定时,样气是在测试循环中,通过预热的采气管从内燃机排气管中不间断抽取的废气。要求在规定测试循环的每个工况中连续测量,其中颗粒物测量时要求将颗粒物的样气用经过处理的环境空气进行不间断的稀释,用适当的滤纸加以收集。在每个工况运行中,测量每种气态污染物的浓度、颗粒物的质量、内燃机的排气流量和输出功率,并将测量值进行加权处理。加权值见图 6-6(b)上各工况上方的百分数。具体细节参见标准 GB 17691—2005。

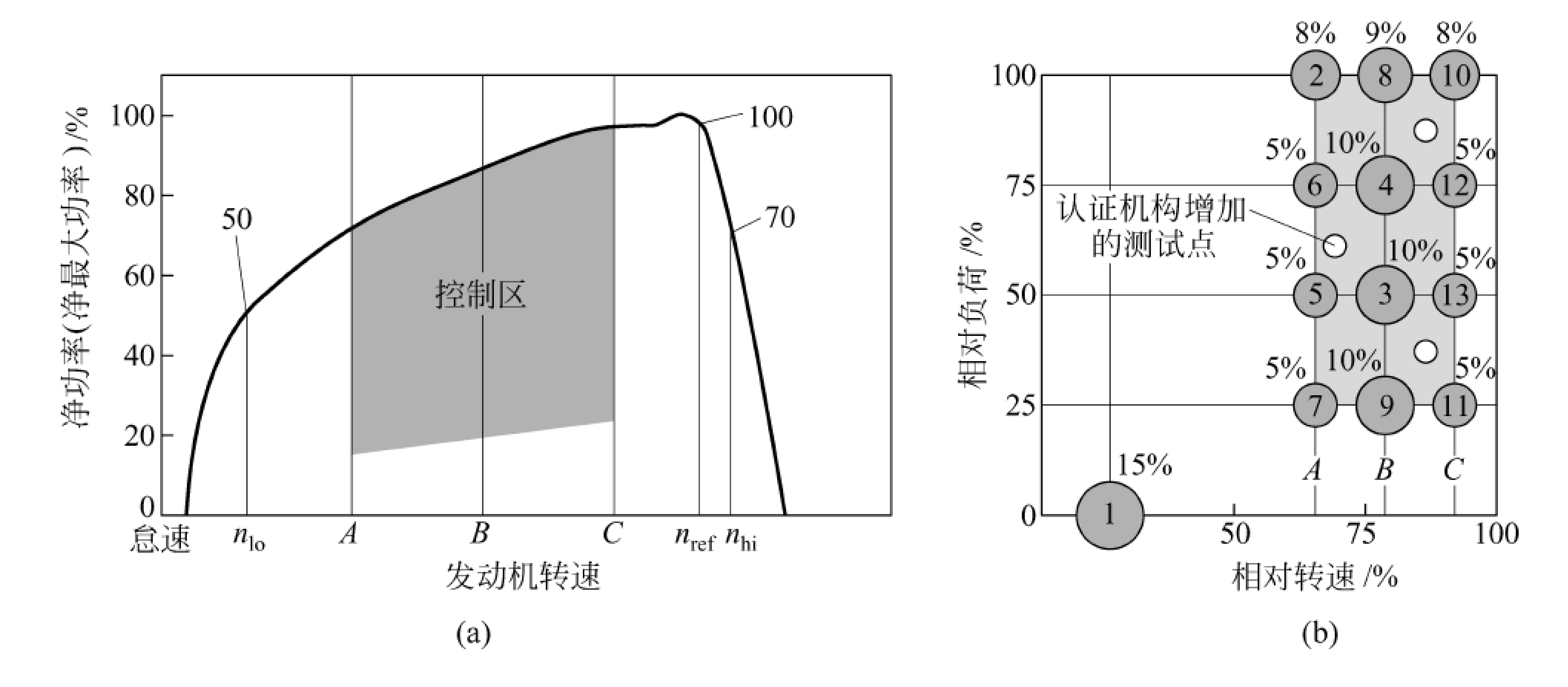


图 6-6 ESC 工况测试循环及其加权系数

取样测量后，按下述计算公式，计算每种污染物的比排放量(g/(kW·h))。

(1) 排气污染物质量流量的计算

每工况排气污染物的质量流量(g/h)按下列公式计算(假设排气在 273 K 和 101.3 kPa 下的密度为 1.293 kg/m^3)。

① 如果直接从原始排气中采样，应使用下列公式：

$$NO_{x\text{mass}} = 0.001587 \times NO_{x\text{conc}} \times K_{H,D} \times G_{EXHW} \tag{6-4}$$

$$CO_{\text{mass}} = 0.000966 \times CO_{\text{conc}} \times G_{EXHW} \tag{6-5}$$

$$HC_{\text{mass}} = 0.000479 \times HC_{\text{conc}} \times G_{EXHW} \tag{6-6}$$

式中：$NO_{x\text{conc}}$，CO_{conc}，HC_{conc}(以 C1 当量表示)——直接采样(原始排气)中的体积分数，10^{-6}；

$K_{H,D}$——NO_x 的湿度和温度校正因子；

G_{EXHW}——测量的排气流量，m^3/h。

② 如果使用全流稀释系统测量气态污染物，从稀释排气中采样，使用下列公式：

$$NO_{x\text{mass}} = 0.001587 \times NO_{x\text{conc}} \times K_{H,D} \times G_{TOTW} \tag{6-7}$$

$$CO_{\text{mass}} = 0.000966 \times CO_{\text{conc}} \times G_{TOTW} \tag{6-8}$$

$$HC_{\text{mass}} = 0.000479 \times HC_{\text{conc}} \times G_{TOTW} \tag{6-9}$$

式中：$NO_{x\text{conc}}$、CO_{conc}、HC_{conc}(以 C1 当量表示)——每工况稀释排气经过背景校正的平均浓度，10^{-6}；

G_{TOTW}——稀释排气流量，m^3/h。

(2) 比排放量计算公式

各个组分的排放量(g/(kW·h))，按照下列公式进行计算：

$$\overline{NO_x} = \frac{\sum NO_{x\text{mass}} \times WF_i}{\sum P(n)_i \times WF_i} \tag{6-10}$$

$$\overline{CO} = \frac{\sum CO_{\text{mass}} \times WF_i}{\sum P(n)_i \times WF_i} \tag{6-11}$$

$$\overline{HC} = \frac{\sum HC_{\text{mass}} \times WF_i}{\sum P(n)_i \times WF_i} \tag{6-12}$$

式中：WF_i——加权系数；

$P(n)_i$——第 i 个工况点的功率。

2) ELR 测试(负荷烟度测试)

ELR 指内燃机负荷响应测试，也就是动态烟度检测测试。该动态烟度测试循环是指在转速 A、B、C 及随机抽检转速 D(由检测单位随机选定，有时转速 D 同 A 或 B 或 C)下负荷从 10%突加到 100%过程中的动态烟度计算值。其测试循环如图 6-7 所示。

图 6-7 中 A、B、C 表示内燃机转速，该转速的确定是由内燃机制造厂按标准 GB 17691—

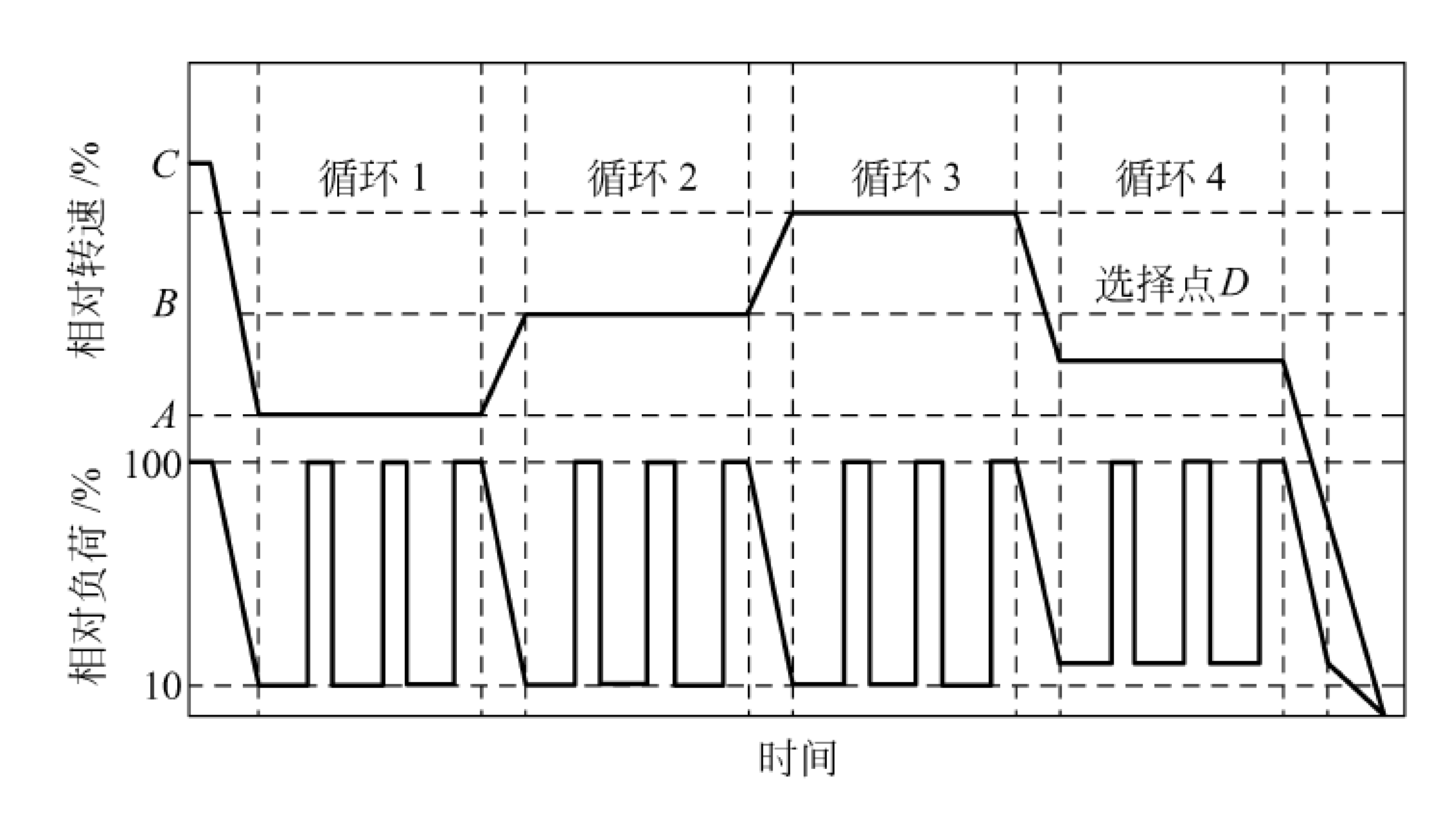


图 6-7　ELR 工况测试循环

2005 中的规定进行确定的，计算公式如式(6-3)所示。图中的循环 4 中的选择点 D 指的是随机抽检转速 D，由检验机构选择。最终的动态烟度测试结果的计算采用贝塞尔算法，计算公式为

$$SV = (0.43 \times SV_A) + (0.56 \times SV_B) + (0.01 \times SV_C) \tag{6-13}$$

式中：SV——ELR 最终测试动态烟度结果；

SV_A、SV_B、SV_C——A、B、C 转速下测得的贝塞尔动态烟度平均值。

内燃机在进行 ELR 循环测试时应在对内燃机进行预处理阶段之后(20±2)s 内开始。所谓预处理就是应在内燃机最大功率点状态预热内燃机和系统，以便按照内燃机制造厂的技术规定，稳定内燃机各参数。预处理同时可使实际测量不受上次试验时排气系统中沉淀物的影响。ELR 测试循环中烟度的测量仪器为不透光烟度计。

3) ETC 试验

ETC 测试循环是指内燃机瞬态循环测试，它是模拟内燃机在实际道路中的运行情况，其测试循环如图 6-8 所示。从图中可看出，内燃机转速和扭矩变化均较快。因此，对汽车内燃机在瞬态工况下的排放控制提出了较高要求。其测试过程主要包括确定内燃机瞬态性能转速范围、测定内燃机瞬态性能功率、形成内燃机瞬态性能曲线、形成基准测试循环等内容，ETC 测试需要测量的排气污染物参见表 6-16。

2. DB 11/964—2013 排放规程和限值

北京地方标准(DB 11/964—2013)是在国标(GB 17691—2005)的基础上参考全球统一技术法规(GTR)制定的。主要增加了具有代表性的两个测试循环：①具有冷、热起动要求的瞬态测试循环(WHTC)；②具有热起动要求的稳态测试循环(world harmonized steady-state cycle，WHSC)。

WHSC/WHTC 测试循环是世界车辆法规协调论坛(World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations，UN/WP29 或 WP29)在制定第 4 号全球技术法规《全球统一的重型

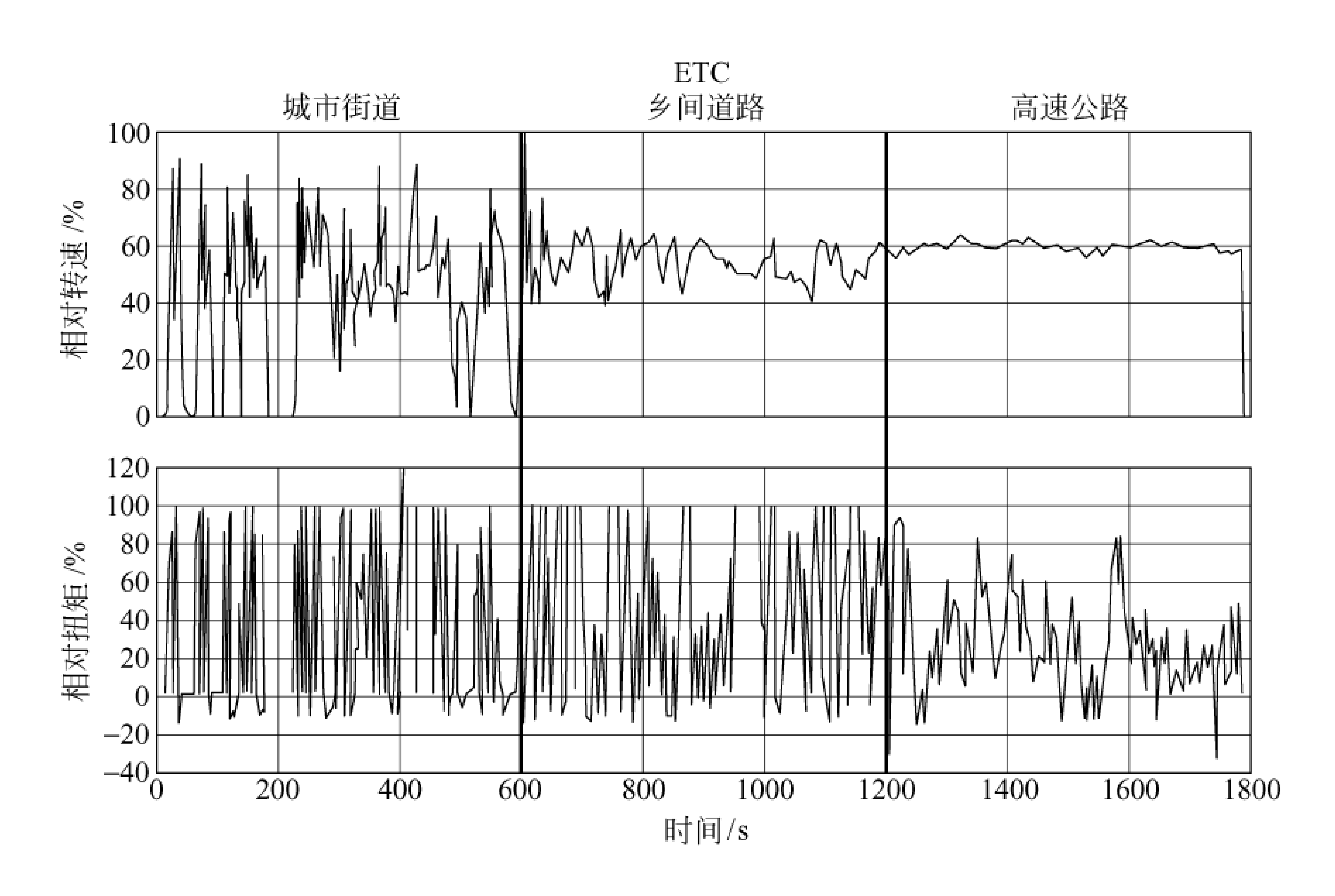


图 6-8　ETC 工况测试循环

车测试规程（WHDC）》时，通过充分考察世界各地的道路状况和各种车辆的行驶特征，而制定出的具有代表意义的测试循环。

WHTC（包含 1800 个逐秒变换的瞬态试验循环）和 WHSC（转速、扭矩及过渡时间连续运行的试验循环）测试程序较全面地反映了世界各地的公路重型内燃机的运行工况，对现在及未来重型内燃机排放性能测试程序具有很好的实用性。测试程序的主要特征如下：

(1) 代表世界各地道路车辆的运行工况；

(2) 在控制道路车辆的排放量方面，能够达到更高的效率；

(3) 有相应的试验、采样和测试技术；

(4) 适用于现有在用的及可预见的将来使用的排气净化技术；

(5) 能够对不同类型的内燃机进行排放水平的比较评估。

1) WHTC 测验循环

WHTC 试验循环如图 6-9 所示。测试循环主要过程为：①WHTC 冷起动测试循环。此过程要求内燃机必须经过自然冷却或强制冷却，并使其润滑油、冷却液及催化器的温度控制在 20～30℃范围内方可进行；②热起动测试循环。此过程要求内燃机完成冷起动测试循环后，立即进行(10±1)min 的热浸(hot soak)处理，然后进行热起动测试循环。

2) WHTC 与 ETC 测试循环主要异同点

WHTC 与 ETC 测试循环都是在 1800 s 内逐秒变化的瞬态工况，但它们在工况的分

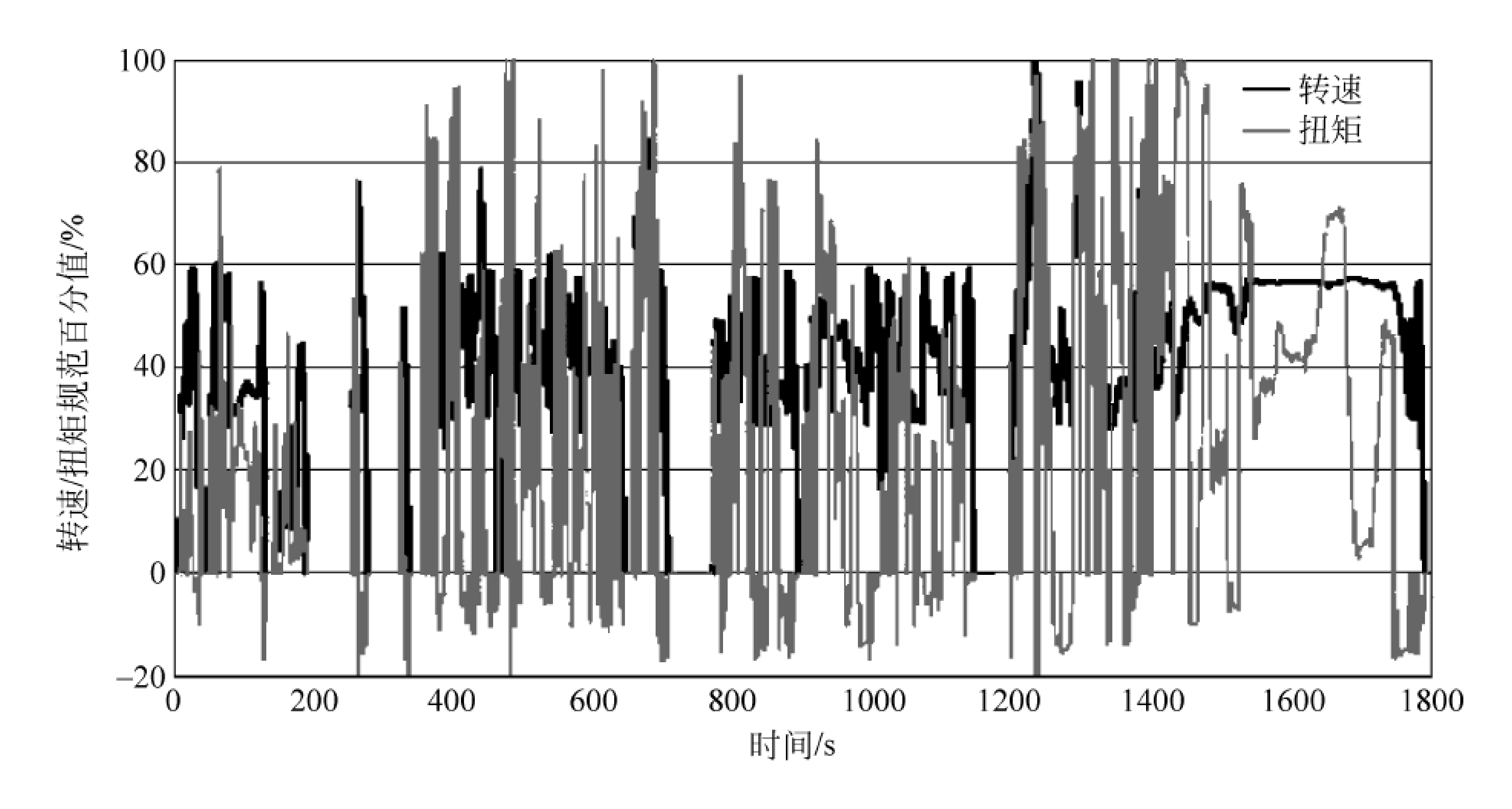


图 6-9 WHTC 测试循环

配、平均排温等方面存在明显的不同，即与 ETC 测试循环相比 WHTC 测试循环更多的关注内燃机在低速、低负荷工况下的排放，如图 6-10 所示。

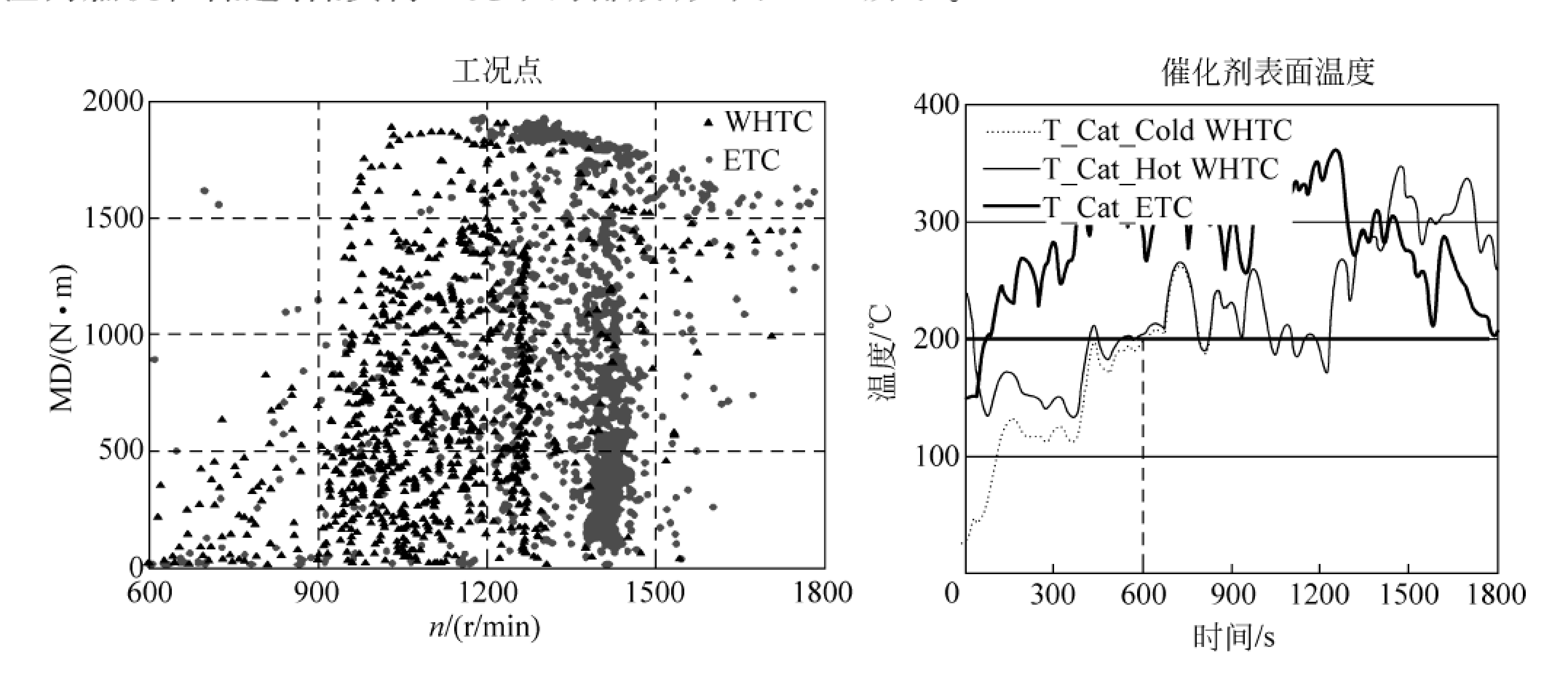


图 6-10 ETC 与 WHTC 转速与排温变化对比

3）WHSC 稳态测试循环

WHSC 稳态试验循环包含了若干转速规范值和扭矩规范值工况，如表 6-17 所示。循环测试过程中，内燃机应按顺序和规定的时间依次运行各工况，各工况之间的转换应在 (20±1)s 内完成，工况变化期间内燃机的转速和扭矩应按线性变化。除序号 1 外，工况开始发生变化的时刻定义为该工况的开始时刻。为了验证循环工况的跟踪性，循环结束后，需对内燃机的实际工况与法规规定的工况进行回归分析。

表 6-17　WHSC 试验循环

序号	转速规范值/%	扭矩规范值/%	工况时间/s
1	0	0	210
2	55	100	50
3	55	25	250
4	55	70	75
5	35	100	50
6	25	25	200
7	45	70	75
8	45	25	150
9	55	50	125
10	75	100	50
11	35	50	200
12	35	25	250
13	0	0	210
合计			1895

4）WHSC 与 ESC 测试循环主要异同点

WHSC 与 ESC 测试循环都选择了具有代表性的 13 个工况来进行测量，但是在运行参数、排气温度等方面有着较大不同，即与 ESC 循环相比，在循环测试过程中，WHSC 循环的权重更加偏向于内燃机的低速、低负荷工况，这对后处理系统的起燃温度提出了更高的要求；ESC 测试循环的转速选择范围较窄，且 3 个转速都是中高转速，在每个转速下分别进行低、中、高负荷的测试，如图 6-11 所示。

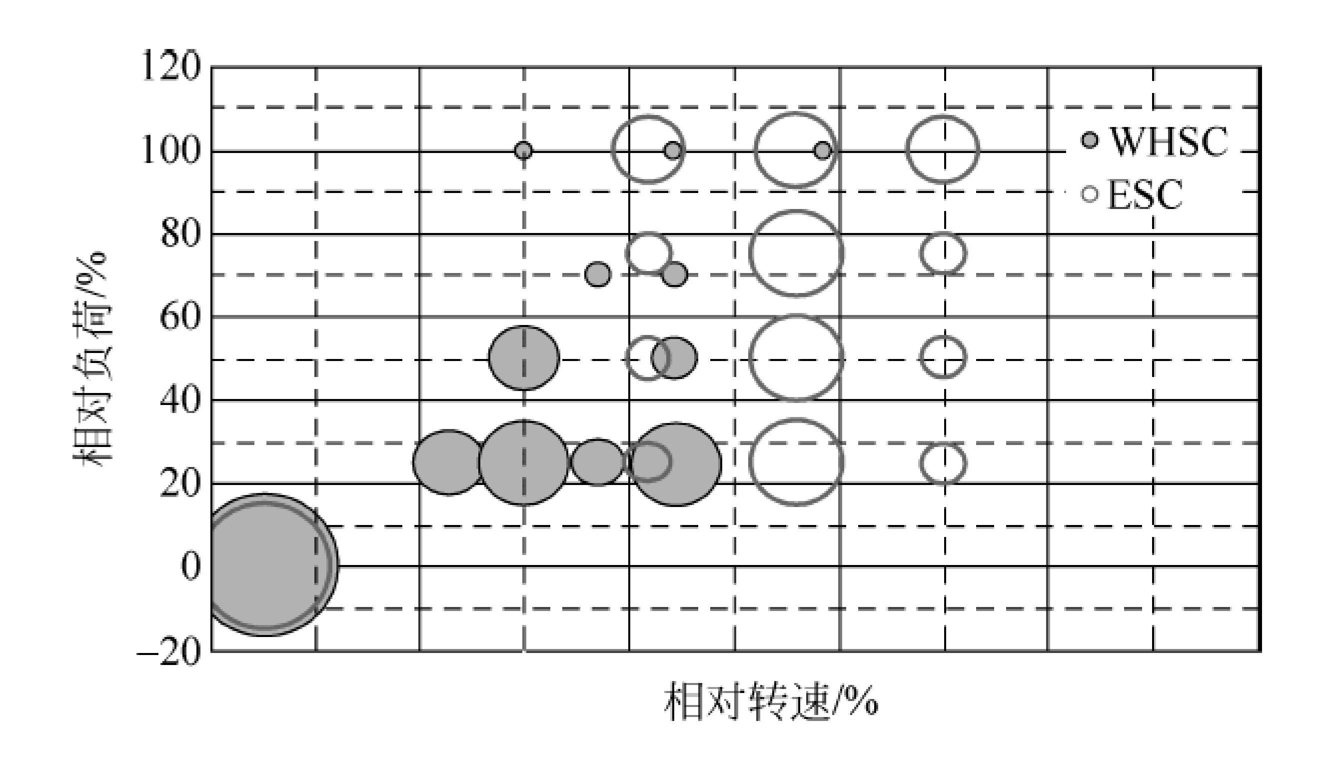


图 6-11　ESC 与 WHSC 测试循环工况对比

参考文献[5]对 WHSC/WHTC 与 ESC/ETC 进行了比较分析，进一步信息读者可参考全球统一技术法规(GTR)及标准 DB 11/964—2013 等。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国国家标准(GB)车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ阶段)[S]. GB 17691—2005. 2005,5.

[2] 中华人民共和国国家标准(GB)轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ阶段)[S]. GB 18352. 3—2005. 2005,4.

[3] 中华人民共和国国家标准(GB)重型车用汽油发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ阶段)[S]. GB 14762—2008. 2008,3.

[4] JOHNSON T V. 2011年轻型车和重型车用内燃机排放控制回顾[J]. 朱炳全,译. 国外内燃机,2013(1):1-15.

[5] 赵国斌,盖永田,耿帅,等. WHSC/WHTC与ESC/ETC测试循环的试验比较与研究[J]. 汽车工程学报,2015(1):29-34.

[6] 环境保护部. HJ 689-2-14 城市车辆用柴油内燃机排气污染物排放限值及测量方法(WHTC工况法)[M]. 北京：中国环境科学出版社,2014.

第7章 电控内燃机匹配与标定试验

7.1 概　　述

现代汽车内燃机对动力性、燃料经济性、排放性能的要求日益严格，提高和改善这些性能的关键是要完善内燃机的工作过程，并采用机外净化技术改善排放。而促进这个目标实现的最佳途径是采用内燃机电控技术。

采用电子控制后，影响内燃机性能的主要调节参数，如提前角、空燃比(喷油脉宽)、废气再循环率、怠速调节器等，都是利用事先标定好的数据(MAP图)进行调节，即由从传感器(油门位置、转速、大气压力、进气流量、水温、油温等)到执行器(电磁阀等)之间预先设定的响应来决定的，这一响应途径由固化在电控单元(ECU)中的程序和数据两个部分的协同工作来完成。程序是内燃机工作原理在电子控制中的反映，即通过电子控制语言表达内燃机工作原理；数据用来确定内燃机的输出性能，即不同的内燃机产品要求标定不同的数据。因此，采用电子控制以后，内燃机开发需要解决一个新问题：如何标定这些数据。

标定的前提是对一些重要部件的结构参数进行合理的匹配，即优化硬件组合，找出最佳方案，然后通过标定试验，使各参数控制在内燃机各种工况下，且均处于最佳组合状态，最终使内燃机性能发挥出最大的潜力，从而保证内燃机具有良好的综合性能。实现上述目标的过程叫做内燃机电控系统的匹配标定工作。

内燃机匹配、标定涉及内燃机原理及结构、汽车理论、计算机原理、数学模型、电子技术、测试原理等多门学科，是一项系统工程，并且建立在各企业长期标定试验积累和试验技巧的基础上。因此，如何对电控内燃机进行匹配、标定，难以用少量篇幅加以概括。本章是作者对所在单位多年科研成果的部分总结，其内容主要针对如何“标定”这一新问题，重点介绍电控内燃机试验标定的基本概念和方法，然后概要描述电控汽油机和电控柴油机标定的基本过程。关于匹配问题，读者可参考相关论文，本章不过多涉及。本章后面的参考文献列举了

一些有关内燃机匹配与标定的文献,仅供读者参考。

7.2 匹配、标定的基本概念

1. 匹配

狭义来说,电控匹配指的是为具有确定用途车型的内燃机配用合适的电控系统。广义来说还包括为实现整车的各种性能要求,而对整车、内燃机、电控系统进行设计、选型、改造、适配、标定的整个过程。

2. 标定

标定是指根据整车的各种性能要求(动力性、经济性、排放性等),调整、优化和确定电控系统软件的运行参数、控制参数和各控制数学模型的整个过程。它包括所有为此而进行的内燃机台架、整车转鼓、“三高”(高温、高寒、高原)试验和实际道路的试验等验证过程。

3. 标定工况节点

标定工况节点是指为进行电控标定而确定的工况点。它们是工况面中的离散点。通常内燃机工况是由内燃机扭矩(或功率或平均有效压力)和转速来确定。但对于电控系统而言,由于扭矩和功率不是直接的控制量,所以电控系统控制软件一般用转速和功率控制量,即绝对压力、进气流量、节气门位置(点燃式内燃机)或油门位置、喷油量(压燃式内燃机)来定义工况点。工况点的测量包括转速的测量和功率控制量的测量。电控系统根据工况节点控制参数或相邻工况节点控制参数的插值来控制内燃机在全部工况下的运行。

4. 三维图及三维图优化

电控系统中的三维图是指由内燃机的转速和功率控制量构成的二维平面(工况平面),加上第三维控制量(喷油量、提前角等),而形成的内燃机运行三维控制图(MAP 图)。对电控内燃机的控制来说,三维控制图很多,最基本的是喷油特性三维图(或脉宽三维图或空燃比三维图)和点火提前角(或者喷油提前角)三维图。

三维图优化是对电控系统软件所定义的所有需标定的工况节点,在稳态条件下,根据内燃机对各种性能指标的综合要求来优化确定电控系统三维控制参数的过程。三维图优化是标定过程中一项很重要的内容。

7.3 匹配、标定的基本内容和方法

7.3.1 基本内容

1. 内燃机与电控系统的硬件匹配

内燃机的动力性、经济性、排放性是相互制约的,而目前内燃机的设计要求是在满足排

放法规的前提下，使其动力性和经济性达到最优。为实现该目标必须选择合适的电控系统硬件与内燃机相匹配，也就是说根据内燃机的使用需要选择适当的电控系统硬件，并将系统硬件正确地安装在内燃机上，同时要保证电控系统机械及电气连接合理可靠。电控系统硬件主要由传感器、电控单元(ECU)和执行器组成。而 ECU 的功能是接收和处理传感器的所有信息，根据对应的控制算法和标定参数计算得到当前控制参数，并驱动执行器以控制内燃机达到所需的性能指标。

2. 电控系统控制参数标定

内燃机电控系统可分为硬件和软件两部分。硬件部分前面已介绍，而软件是由程序和控制参数(供油脉宽、提前角等)组成。从理论上讲，对一个电控系统，只要改变其软件部分的控制参数值，就可配用于基本类型相同但参数不同的内燃机，比如，用于功率、缸径、压缩比、转速都不同的同类型的四缸机就是一例。若进一步对硬件和软件程序进行部分改动，一个电控系统原型还可配用于各种不同内燃机，比如同是汽油机，4 缸、6 缸，缸数不同，直列、V 形，排列不同等。但不管怎样匹配，在电控系统软件数学模型和硬件基本确定的前提下，能不能使被匹配的内燃机在满足排放法规的前提下发挥出最好的综合性能，取决于能否获得软件部分的最佳控制参数。

从控制技术的角度来看，内燃机是一个动态、多变量、高度非线性、具有响应滞后的时变系统，其工作过程涉及工程热力学、空气动力学、流体力学、燃烧学、化学动力学等多门学科。因此，采用简单的经典线性控制理论来求得控制参数优化值的方法已不可能；通过复杂的内燃机模型来实时求取控制参数值的办法，在目前的硬件技术上也很难完全实现。所以在开发电控内燃机时，为获得最佳控制参数，首先要进行大量的试验，通过试验获得内燃机各种工况下的动力性、燃油经济性以及排放性能等试验数据，然后按照相关法规的要求，对这些试验数据按照一定的优化准则，采取适当的优化方法，获得控制参数和各种修正参数随内燃机转速和负荷等因素变化的规律。这些变化规律可能非常复杂，难以实时计算，但可以采用三维图、二维曲线等简单的离散形式来表示，并存储在电控单元中，即所谓的 MAP 图。在电控内燃机实际运行时，一般来说，电控单元根据采集到的内燃机工况参数，首先在存储的基本 MAP 图上查到控制的基本数据，然后根据内燃机状态参数(水温、大气压力等)，按照预设的控制算法或修正图表对 MAP 图查到的基本数据进行修正计算，就可以得到送给执行器的控制量(如供油量、喷射定时等)，从而达到实时控制内燃机的目的。此即所谓的查表法或查 MAP 图法。关于 MAP 图及标定过程详见后面章节。

3. 电控内燃机试验标定系统

为实现电控内燃机控制参数的标定，需要有良好的试验标定系统。电控试验标定系统应具有如下的基本功能：

(1) 能实时监控和显示各种传感器和执行器的信号、MAP 图的图形数据和内燃机各种状态参数值，以便及时确定被标定的节点和应标定或修改的参数值；

(2) 能对电控 MAP 图进行实时在线修改;

(3) 应具有软件编程、数据管理等功能,使修改后的 MAP 图能顺利预置于 ECU 中;

(4) 配套的内燃机台架及测试设备应满足电控内燃机试验、测试的各种基本要求。

图 7-1 是某电控柴油机试验标定系统示意图,该系统主要由 ECU 标定系统、数据采集及分析系统、柴油机台架测试设备组成。

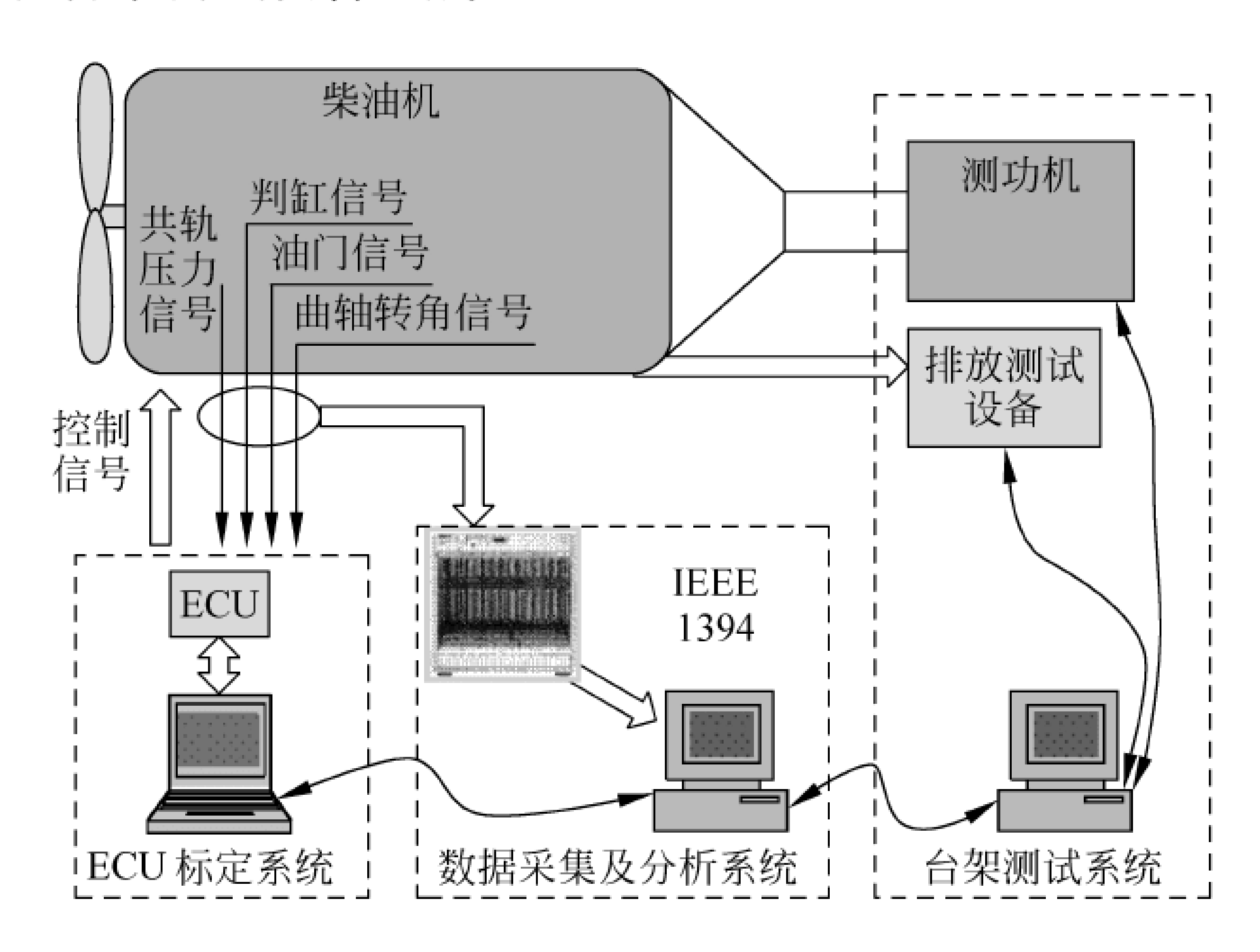


图 7-1 某电控柴油机台架标定系统示意图

ECU 标定系统的硬件主要由装有标定程序的 PC 机和连接 PC 与 ECU 的转换器组成,它具有软件编程、控制参数标定、数据库管理、在线评估、离线评估、打印等功能。在标定过程中,用户操作标定界面,根据数据采集系统、台架测试系统检测到的内燃机油耗、动力性和排放等指标,对电控 MAP 进行在线修改,直至找到最优控制参数,完成标定匹配的工作内容。

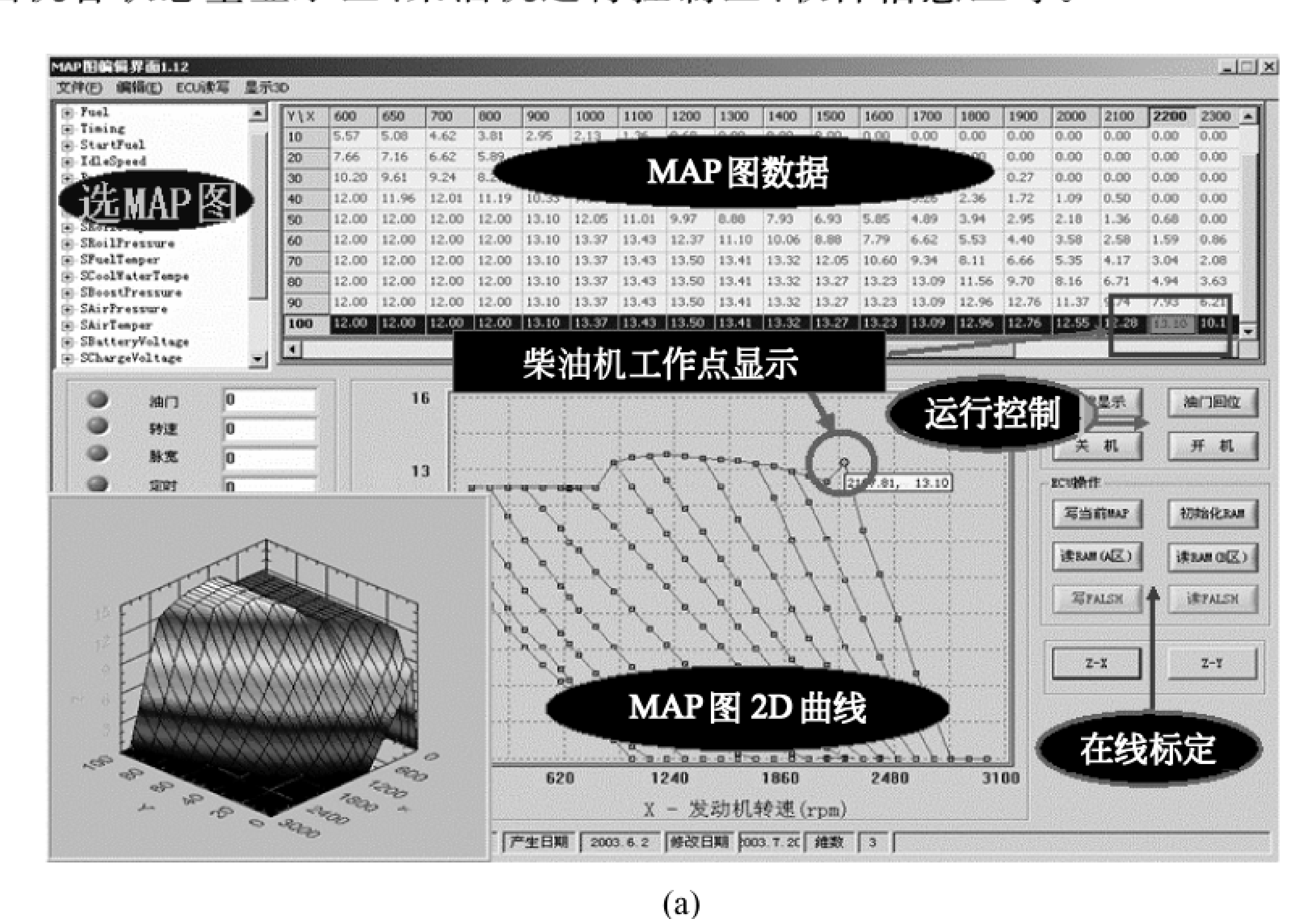
修改好的 MAP 图被转化为二进制形式的数据文件预置于 ECU 中,ECU 根据传感器得到的内燃机转速、加速踏板位置、温度和压力等状态信息,从预置在 ECU 中的 MAP 中得到对应的控制对象参数(如喷油量、喷油定时、喷油压力等),向执行器发出控制指令。

台架测试系统主要用于实验台架控制、内燃机性能和排放测试,是内燃机工况控制设备和性能评价设备。

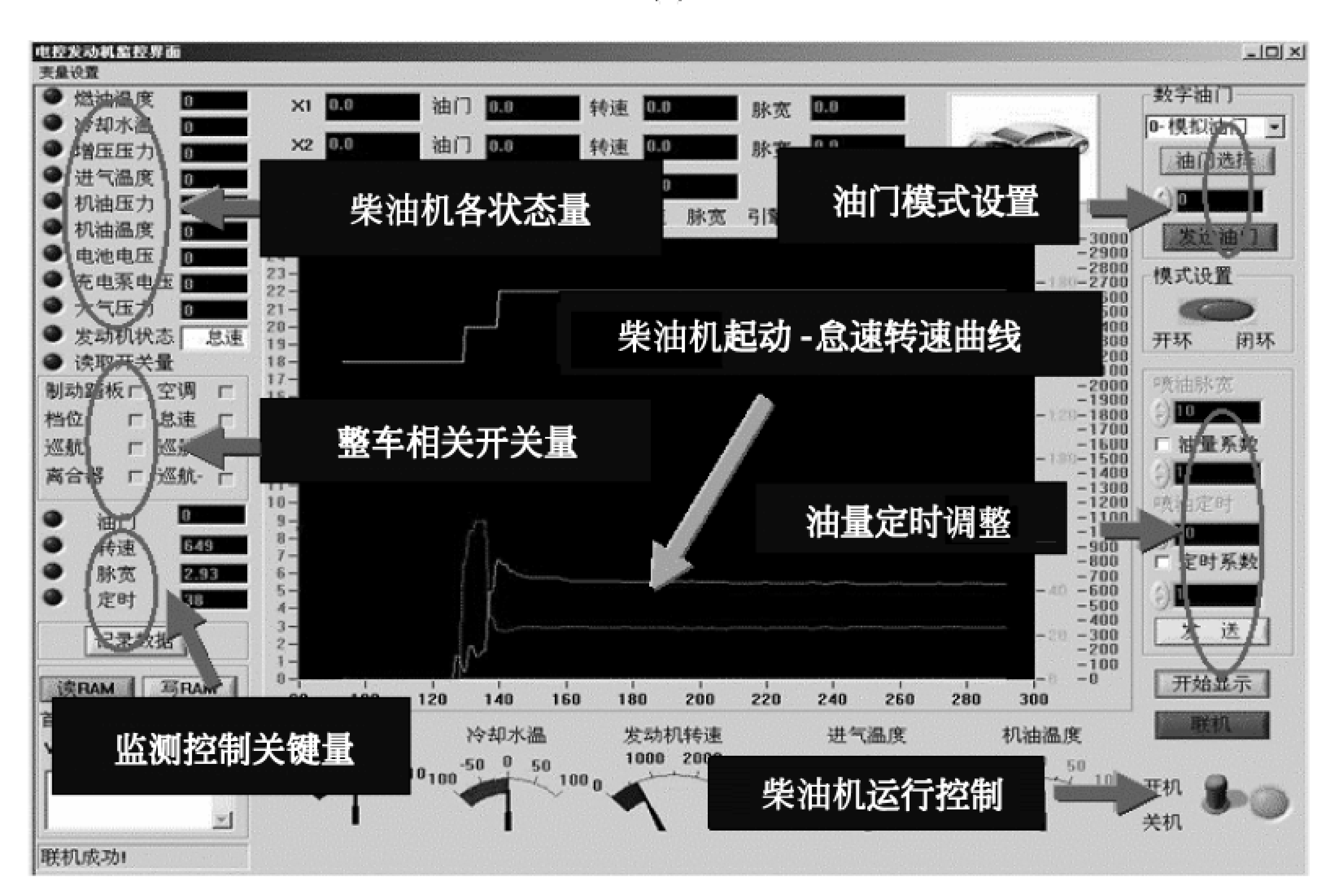
数据采集与分析系统主要用于控制系统中各类传感器信号和执行器信号的监测与分析,它与标定系统的不同之处在于,数据采集系统用于监测实际执行情况,分析系统用于监测 ECU 收到的传感器信号和发出的控制指令。这两个系统共同用于电控系统的调试与分析。当 ECU 标定系统较为完善时,可以不用数据采集与分析系统,其功能可完全由 ECU 监控系统代替。

在匹配标定过程中,要有与下位机控制程序相配合的上位机标定工具软件,该软件可对电控单元内部任意参数的变化情况进行全面监视、显示并保存动态过程数据,并具有数据离

线处理、实时在线修改任意一个 MAP 图中的任一节点以及对各传感器和执行器进行测试诊断等主要功能。图 7-2 是某典型国产电控柴油机匹配标定界面示意图。图 7-2(a)主要包括：MAP 文件区(图上“选 MAP 图”部分)、MAP 图数据显示区、柴油机工作点显示、数据曲线图形显示区、在线标定区、二维图的坐标显示变换选择区(2D 曲线)等；图 7-2(b)主要包括：柴油机各状态量显示区、柴油机运行控制区、软件信息区等。



(a)



(b)

图 7-2　某电控柴油机台架标定界面

图 7-2(a)中,MAP 文件区显示了所有的控制参数 MAP 名字,可以根据需要选定要修改的 MAP。被选定的 MAP 数据会在 MAP 数据显示区显示,并支持手动输入修改。选定的 MAP 图形曲线可在数据曲线图形显示区显示,可选择二维或三维显示。二维显示时可在坐标选择区选择显示 *X-Z* 或 *Y-Z* 坐标下的图形。图形显示区域支持鼠标直接拖动曲线修改 MAP 数据。修改后的 MAP 数据可直接在在线操作区在线写入 RAM,实现控制 MAP 的在线匹配标定。数据下载区用于完成数据 MAP 的下载,效果同编程器功能。文件操作区用于实现对 MAP 文件的存储与载入。软件信息区显示当前 MAP 的名称、维数以及软件的更改信息等。

在图 7-2(b)中,柴油机的主要状态参数可以在参数显示区进行实时显示,如转速、油门、脉宽、定时(喷油、点火)、冷却水温、燃油温度、中冷后温度、中冷后压力等。

7.3.2 标定的基本步骤

通常所说的电控内燃机标定,实际上主要是指电控系统 MAP 的标定,而电控系统 MAP 的标定主要包含两个方面:法规工况的标定和非法规工况的标定。法规工况标定时,应在满足排放、油耗法规的前提下,使内燃机性能达到最优;非法规工况匹配标定的目标则更关注内燃机的动力性、经济性和驾驶性。排放法规不同,对内燃机各性能的要求也不同。因此,需视具体的排放法规的要求而定。但匹配标定试验的基本过程则大致相同,图 7-3 所示为内燃机匹配标定试验基本框架。

不同电控系统标定的工作量会有很大差异,如一种简单的基本电控系统可能只需要数百个标定数据的获取和调整;而一种复杂的且功能强的电控系统可能需要数千个数据。这些数据一般分为:内燃机稳态工况标定参数、稳态修正曲线、非稳态工况标定参数、怠速及起动工况控制参数、特殊功能控制参数、程序运行控制参数以及故障诊断参数。

7.3.3 MAP 图工况节点的确定

工况节点对应内燃机在台架标定试验中所用到的工况点(即转速和负荷)。所有的工况点形成了一个转速-负荷的二维工况平面。行车时(内燃机工作时)节点之间的数据通过插值计算来获得。节点数量多控制精度就高,但工作量也大。另外节点的多少受到 ECU 使用的单片机存储器容量大小的限制。为合理协调精度与工作量,工况节点的选择应遵循的原则是:内燃机性能变化大、使用频率高的区域和在使用中有特殊要求的工况(如排放测试中使用的工况),节点密度应适当大一些,工作要细一些;节点的范围应该能够覆盖内燃机整个工作范围。工况使用频率和变化趋势是对内燃机的使用工况进行统计调查后获取的,即调查各种工况在实际使用中出现的次数,再绘制工况频次统计图后得知。工况节点如何分布则是由试验工程师根据需要及经验确定,并在 ECU 控制软件中体现。在图 7-2(a)的中下部有节点安排图示。由图可以看出外特性线上的节点就比较密集。

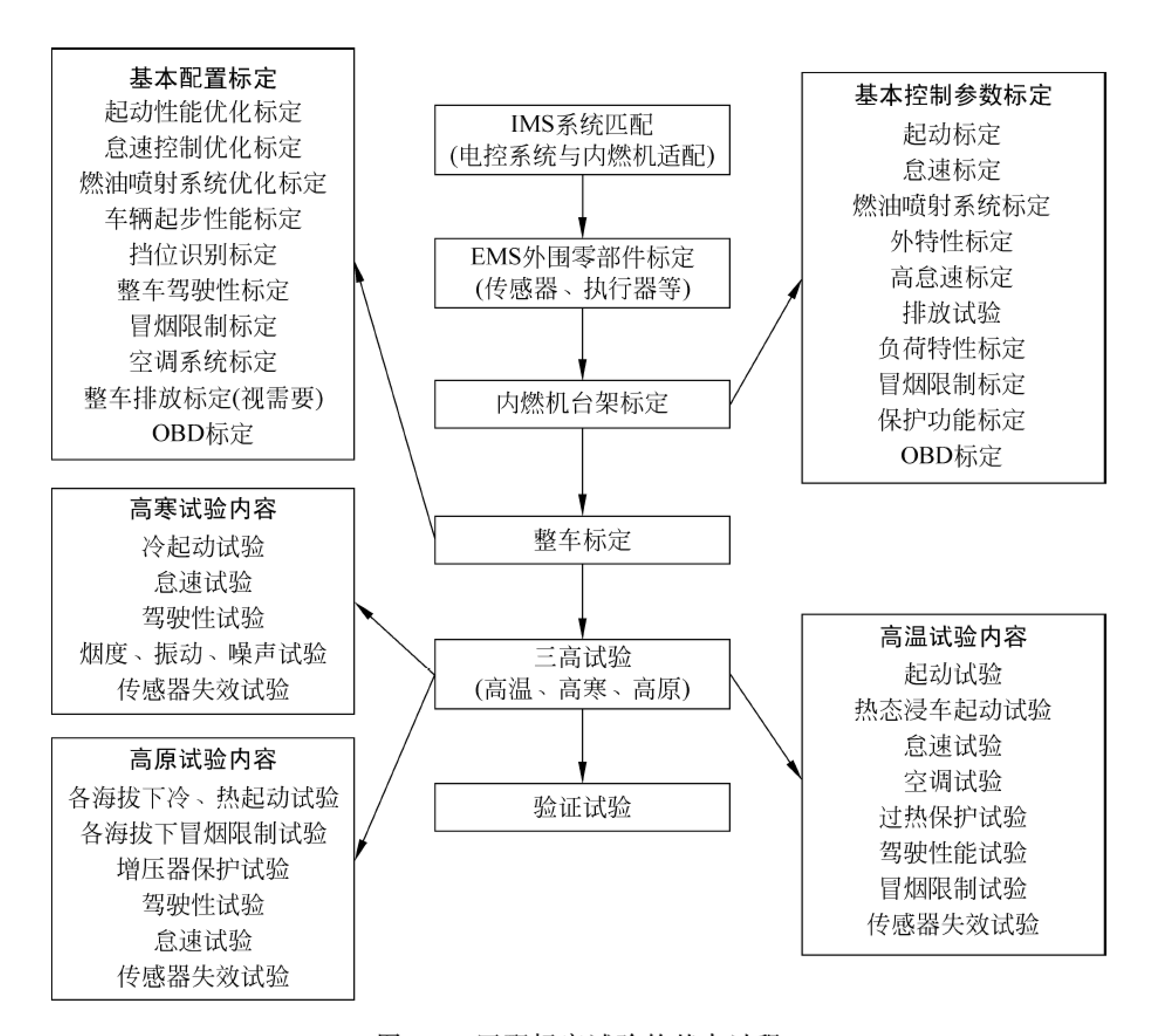


图 7-3　匹配标定试验的基本过程

7.3.4　MAP 图中控制参数的优化方法

对于内燃机电控系统控制参数的标定有两种优化思路：局部优化和全局优化。局部优化和全局优化的区别在于进行控制参数标定时，是对各个工况点单独地进行优化，还是将若干个工况点综合起来进行优化。进行优化时，首先要确定优化目标和约束条件，而优化目标和约束条件都与汽车对内燃机性能的要求密切相关。不同内燃机有着不同的优化目标和约束条件，与之相对应就形成了不同的优化思想。

1. 局部优化

局部优化只在特定的内燃机运行工况下进行，与其他工况点无关，即独立地对各个工况点的控制参数进行优化，不必考虑工况点间的相互影响。同时，目标函数与约束条件的变化只与控制参数的变化有关。以高压共轨柴油机为例，要寻找某一工况下(如某一转速和油门踏板位置)内燃机可能出现的最低燃油消耗率，则燃油消耗率只与喷油提前角、油轨压力等控制参数有关，此外，为保证内燃机的正常运转以及满足排放法规的要求，还要设置一些约束条件

如排气烟度限制、排温限制、最大缸内压力限制等。它们在不同的工况点可以有不同的定义。

对于某高压共轨柴油机,控制参数的局部优化问题,可表示如下(以最低燃油消耗率为例)。

优化目标函数:$\min b_e(n,q,P_{CR},\varphi_{is})$(此时,$n$ 与 q 恒定)

优化约束条件:

$$T_{ex} \leqslant T_{ex_Lim}$$
$$P_{max} \leqslant P_{_Lim}$$
$$NO_x \leqslant NO_{x_Lim}$$
$$\mathrm{Smoke} \leqslant \mathrm{Smoke}_{_Lim}$$

式中:b_e——燃油消耗率;

n——内燃机转速;

q——循环供油量;

P_{CR}——油轨压力;

φ_{is}——喷油定时;

T_{ex}——排气温度;

P_{max}——缸内气体最高压力;

NO_x——NO_x 含量;

Smoke——排气烟度;

$P_{_Lim}$——最高爆发压力限值;

NO_{x_Lim}——NO_x 排放指标的限值;

T_{ex_Lim}——排气温度限值;

$\mathrm{Smoke}_{_Lim}$——排气烟度的限值。

这是单目标、多变量、多约束的多维优化问题,在满足约束条件的内燃机控制参数范围内找到使该工况的内燃机燃油消耗率最低的控制参数组合即可。

2. 全局优化

全局优化是将一系列的工况点综合起来进行控制参数的优化,最典型的情况是在一个排放法规试验循环内的各个工况中进行优化,在满足排放法规的前提下,通过优化追求特定性能的最佳目标。无论是为了满足法规的要求,还是为了提高内燃机在实际运行中的整体性能,对多个工况点的内燃机控制参数进行综合的全局优化是必需的。

如对于某共轨柴油机的燃油消耗率,控制参数全局优化问题,可如下表示。

优化的目标函数:

$$\min \sum W_i \cdot b_{ei}$$

优化的约束条件:

$$\sum (W_i \cdot HC_i) \leqslant HC_{_Lim}$$
$$\sum (W_i \cdot CO_i) \leqslant CO_{_Lim};$$
$$\sum (W_i \cdot NO_{x_i}) \leqslant NO_{x_Lim};$$

$$\sum (W_i \cdot \text{Smoke}_i) \leqslant \text{Smoke}_{_\text{Lim}}$$

式中：i——工况点序号，$i=1,2,\cdots,n$；

W_i——工况点的加权值；

b_{ei}——工况点燃油消耗率；

$HC_{_Lim}$——HC 排放指标的限值；

$CO_{_Lim}$——CO 排放指标的限值；

NO_{x_Lim}——NO_x 排放指标的限值；

$Smoke_{_Lim}$——Smoke 排放指标的限值。

全局优化的结果依赖于试验循环内不同工况下控制参数的调整。优化后的标定方法，则因优化对象和优化目标不同、标定人员所具备的经验的多少以及所使用的标定工具的不同，而有不同的标定方法。

目前采用比较多的一是基于试验的电控系统标定法；另一则是基于模型的电控系统标定法。关于基于模型的电控系统标定技术方法，读者可查阅相关技术文献。

7.4　电控汽油机标定试验

电控汽油机的标定主要有两个步骤：首先是在汽油机台架上进行所有 MAP 图及各种修正曲线、经验公式的标定与确定；然后是整车道路试验或转毂试验的进一步 MAP 图优化。其中最主要和最基本的工作是通过台架试验获取汽油机各个稳定工况下的基本 MAP 图。汽油机的基本 MAP 图很多，其中空燃比与点火提前角是影响汽油机动力性、经济性和排放的两个最重要因素。下面重点对汽油机台架试验上空燃比特性 MAP 图和点火特性 MAP 图的制取进行介绍，在此基础上介绍基于模型的标定方法，包括扭矩模型 MAP 的制取方法以及气门可变正时（VVT）的 MAP 制取方法。

1. 空燃比特性 MAP 图的制取

ECU 对空燃比的控制是通过对燃油喷油量的控制来完成的。汽油机工作时，ECU 从传感器得到当前的空气流量及各种相关参数的信息，通过喷油脉宽公式计算后得到喷油量值，从而使混合气的空燃比达到预先设定的值。

影响喷油脉宽的因素有空气流量、充气温度、充气效率、进气歧管绝对压力、空燃比、加速加浓量、减速减稀量和减速断油、废气再循环率、电压、喷嘴常数等。由于影响因素繁多，就目前的技术开发水平，比较成熟的标定方法是：通过试验标定过程或先进行简单计算来确定各个工况节点的基本喷油脉宽 MAP 图，然后再通过试验得到各种参数的修正 MAP 图，再进行实时反馈来确定最终目标值。图 7-4 是基本喷油脉宽标定结果的一个图例，图 7-5 表示的是某汽油机试验标定的排气温度修正量 MAP 图。

于是，ECU 通过 MAP 图，采用查表法得到汽油机在不同工况、不同环境状态、不同影响因素下的基本参数及修正系数，最后根据计算公式即可实时计算出汽油机喷油脉宽。

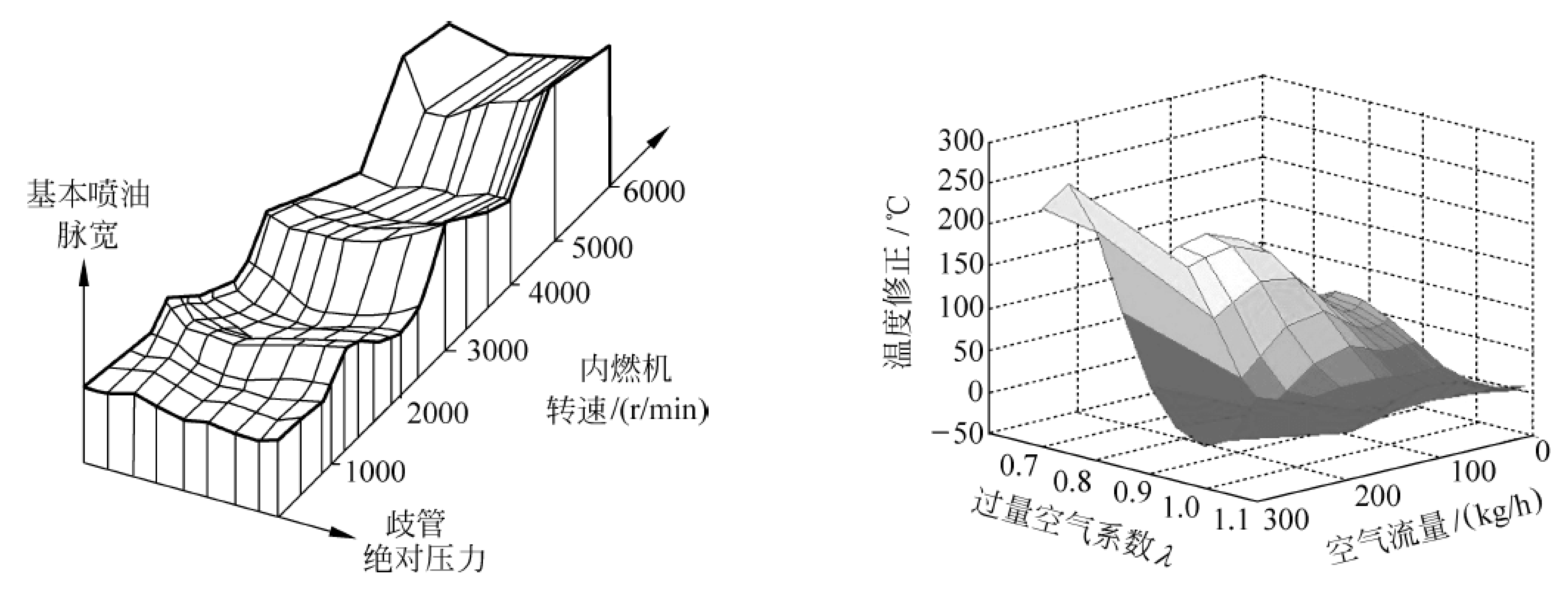


图 7-4　某汽油机基本喷油脉宽标定结果　　　　图 7-5　排气温度修正量 MAP 图

基本喷油脉宽的标定及计算方法有很多种，如根据特定算法计算得到或根据已有的类似机型的数据来确定基本喷油脉宽 MAP 图。图 7-6 表示的是基本喷油脉宽计算产生的过程。图 7-7 是参考文献[3]给出的确定目标喷油脉宽的主要思路，计算公式可根据式(7-1)的方法进行确定。随着技术的进步，该计算公式将会被不断地完善。

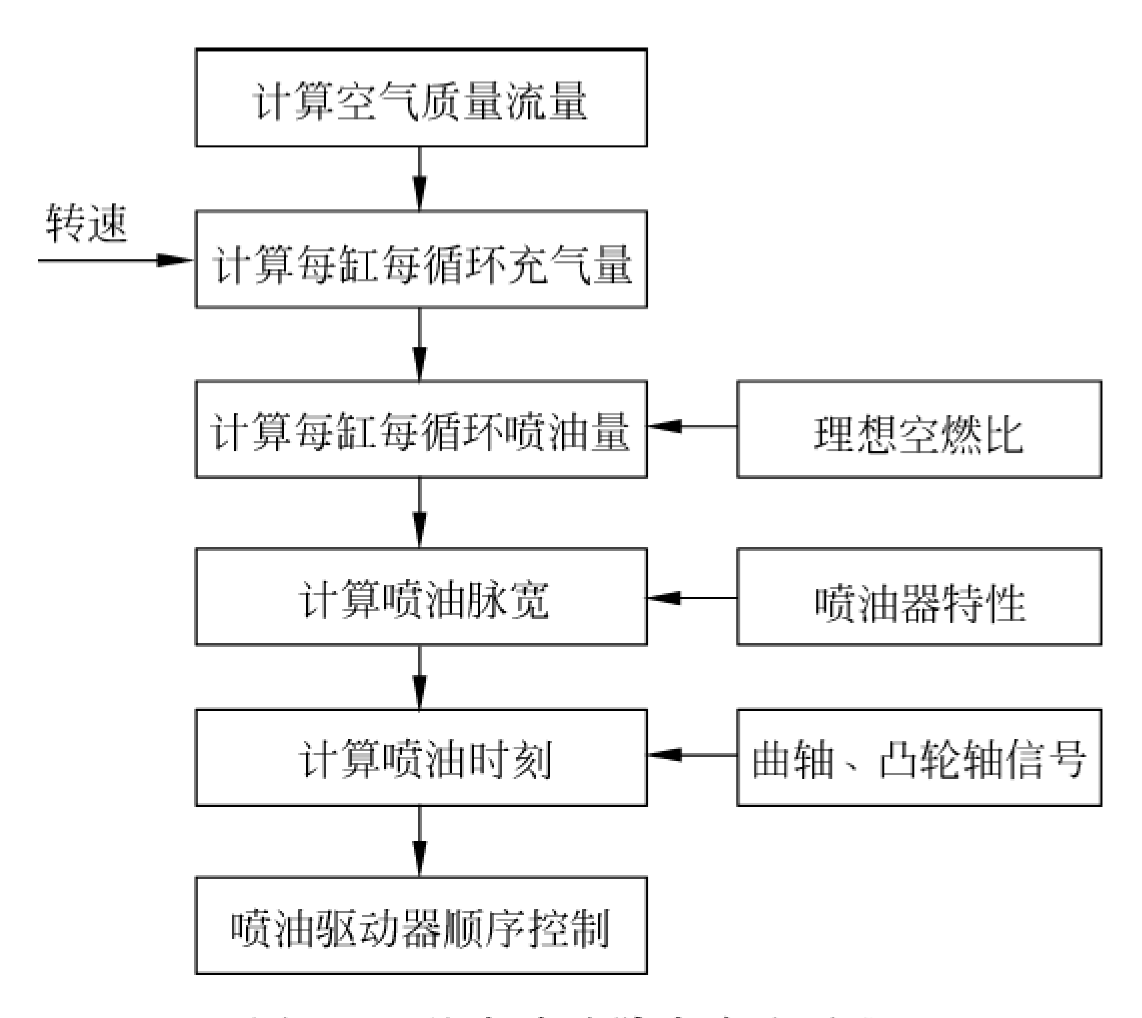


图 7-6　基本喷油脉宽产生过程

$$\begin{aligned}\text{喷油脉宽} =& \text{脉宽常数} \times \text{进气歧管绝对压力} \times \text{汽缸充气效率} \times \\ & \frac{1}{T} \times \frac{1}{A/F} \times \text{闭环修正因素} \times \text{自学习修正} + \\ & \text{油泵低压修正} + \text{喷嘴低压修正系数} + \cdots \end{aligned} \tag{7-1}$$

式中：脉宽常数主要与喷嘴流量特性有关，通过试验获得；T 是充气温度，与水温和进气温度有关；自学习修正是用来修正汽油机因运转时间增长而产生的缓慢变化及汽油机和整车的生产散差；当进气系统的结构一定时，汽缸充气效率(实际进入汽缸内的空气流量与根据

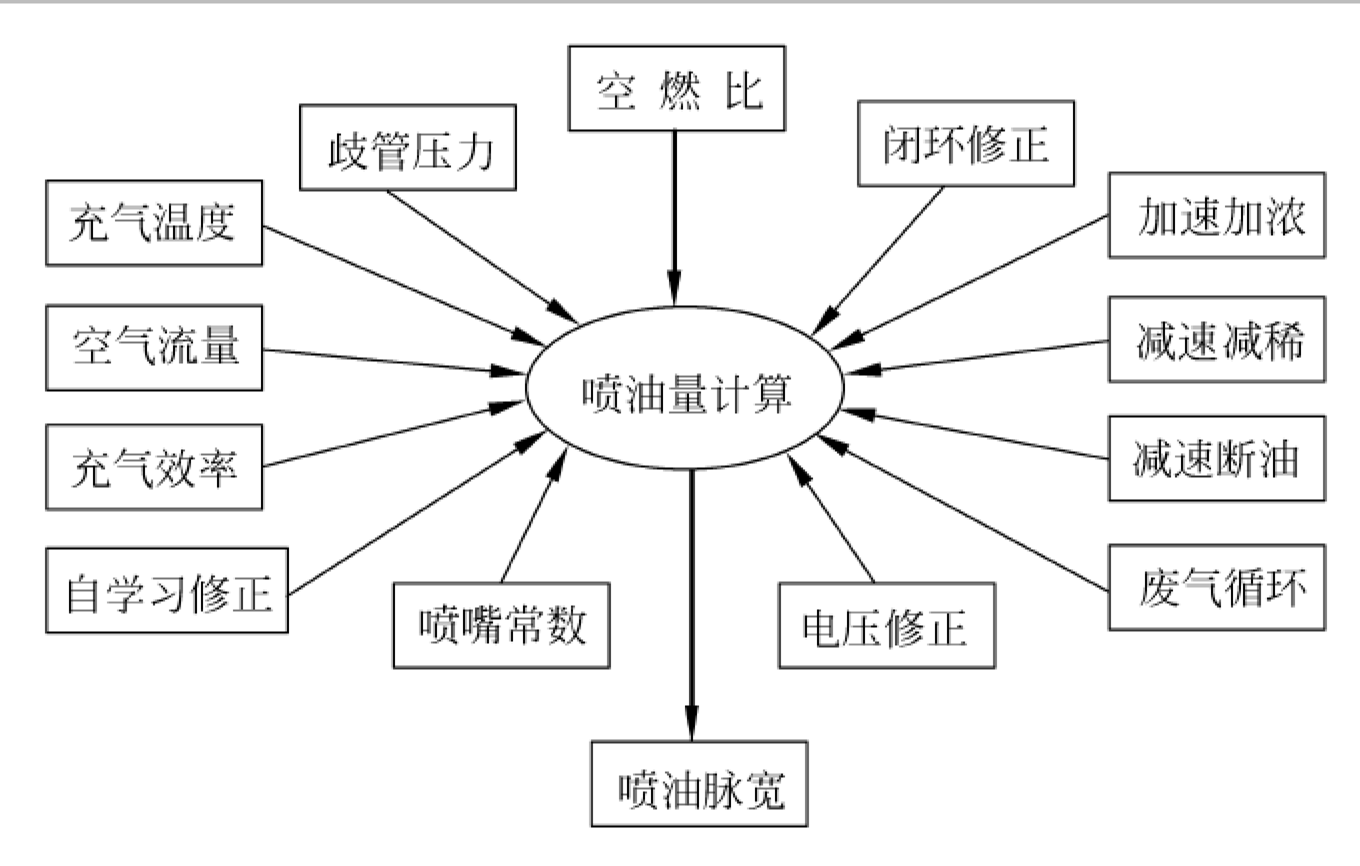


图 7-7　目标喷油脉宽计算思路

理想状态方程推算的空气流量的比值，也叫容积效率）由汽油机进气状况决定，其大小随汽油机转速和负荷变化，难以通过简单计算获得，通常办法是通过试验获得。表 7-1 是充气效率标定试验结果的表格示意，它是以转速为横坐标、进气歧管绝对压力为纵坐标的三维表格。

在目标空燃比标定过程中，为了提高汽油机外特性的动力性，需要通过加浓空燃比（$A/F<14.6$）来实现。即为寻找到最佳的动力加浓空燃比，需要通过空燃比扫描（逐步采点）（增加以空燃比为控制目标的试验点）试验来寻找最优值。试验步骤为首先固定汽油机转速和油门（油门全开），从理论空燃比（14.6）开始以一定步长不断加浓空燃比，随着空燃比加浓扭矩不断增加，当扭矩达到最大时则为最佳动力加浓空燃比，如图 7-8 所示。需要注意的是，随着空燃比的加浓，比油耗也会急剧增加，因此必要时需要平衡两者的关系，作一定取舍，比如在低转速油门全开等常用工况下，需要优先考虑油耗性能，而在中高转速油门全开工况下，则优先考虑动力性能。除此之外，高转速工况下汽油机排温较高，为了保护排气歧管、增压器和三元催化器等排气系统部件，采取较浓的空燃比可降低排气温度。

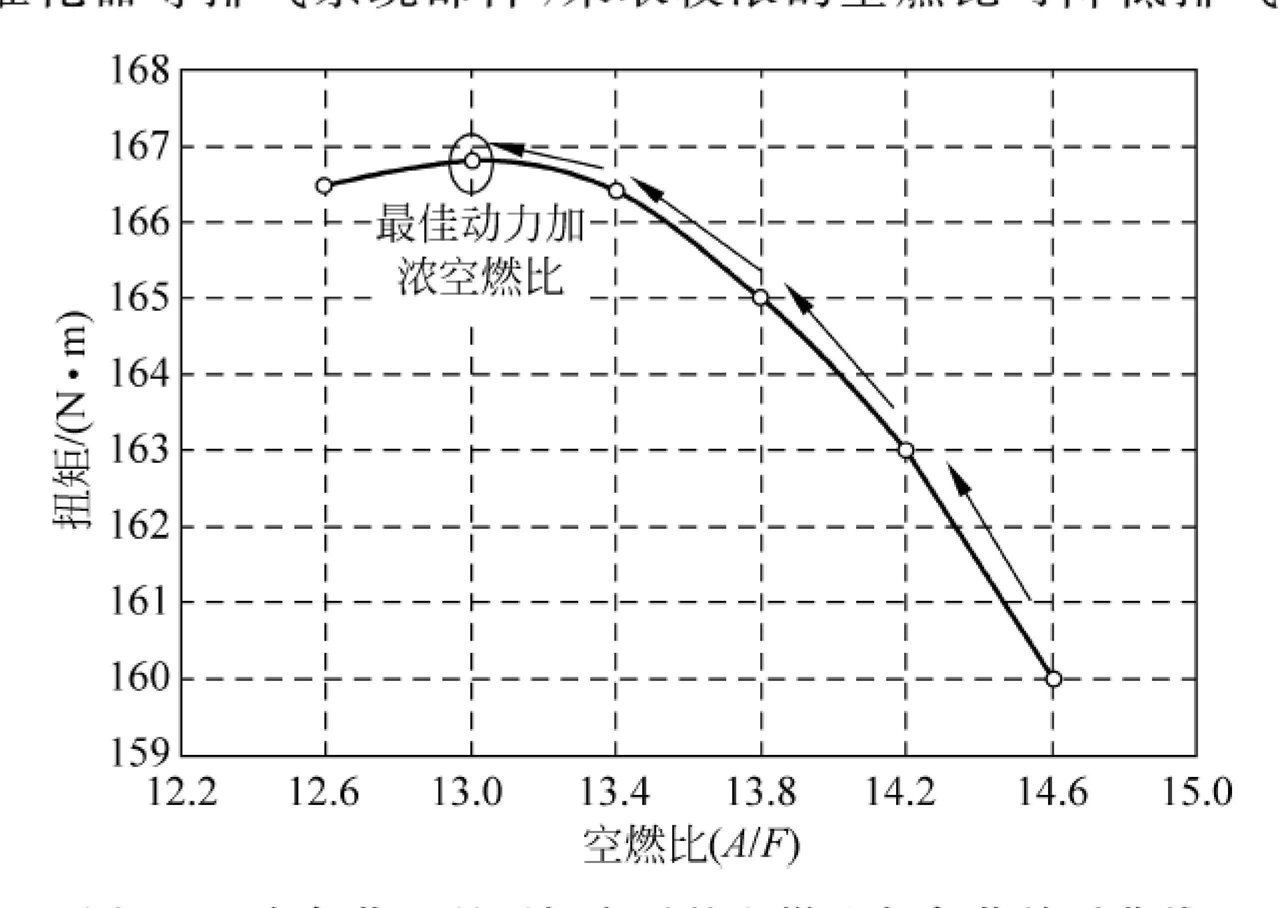


图 7-8　全负荷工况下标定后的空燃比与负荷关系曲线

表 7-1　充气效率标定试验表格

进气歧管绝对压力 \ 转速	400 r/min	800 r/min	1200 r/min	1600 r/min	2000 r/min	2400 r/min	2800 r/min	3200 r/min	3600 r/min	4000 r/min	4400 r/min	4800 r/min	5200 r/min	5600 r/min	6000 r/min	6400 r/min
20 kPa	60.156	60.156	60.156	60.938	63.281	69.141	70.313	69.141	74.219	74.219	74.219	73.047	71.094	71.094	71.094	71.094
25 kPa	60.938	60.938	60.938	59.766	67.188	71.094	70.313	70.313	75.000	75.000	75.000	74.219	73.047	73.047	73.047	73.047
30 kPa	66.797	66.797	66.797	67.969	67.969	73.047	70.313	71.094	76.953	76.172	76.172	75.000	74.219	74.219	74.219	74.219
35 kPa	72.266	72.266	72.266	76.172	71.094	76.953	75.000	72.266	74.219	79.297	78.125	78.125	76.172	76.172	76.172	76.172
40 kPa	76.172	76.172	76.172	78.125	73.047	79.297	76.953	75.000	78.516	81.250	81.250	80.078	76.172	76.172	76.172	76.172
45 kPa	76.563	76.563	78.125	79.297	75.781	82.031	81.250	79.297	80.469	83.984	83.984	83.203	79.297	79.297	79.297	79.297
50 kPa	78.125	78.125	80.469	80.469	76.953	83.984	83.984	80.078	83.203	85.938	86.719	85.156	81.641	81.641	81.641	81.641
55 kPa	79.297	79.297	82.031	82.031	82.031	85.156	85.547	80.859	83.984	87.109	87.500	86.328	83.203	83.203	83.203	83.203
60 kPa	80.078	80.078	82.813	83.984	80.078	85.938	87.109	84.766	85.156	89.453	89.063	87.500	83.984	83.984	83.984	83.984
65 kPa	81.250	81.250	83.984	83.984	81.250	87.109	87.500	85.156	85.938	90.234	90.234	88.281	85.938	85.938	85.938	85.938
70 kPa	81.250	81.250	85.156	85.156	82.813	87.500	89.063	86.719	87.500	90.625	91.797	89.844	89.063	87.109	87.109	87.109
75 kPa	82.031	82.031	85.156	83.984	83.984	88.281	89.063	88.281	88.672	92.188	93.359	92.188	91.016	88.281	88.281	88.281
80 kPa	82.031	82.031	85.938	85.938	83.984	89.063	89.844	89.063	89.453	94.141	93.359	92.578	92.188	88.281	88.281	88.281
85 kPa	83.203	83.203	87.109	87.109	85.156	89.844	90.234	90.234	90.234	94.141	96.094	94.531	92.969	88.281	88.281	88.281
90 kPa	83.203	83.203	87.109	87.109	85.938	91.016	91.016	91.016	91.016	94.141	96.064	94.922	94.141	89.063	89.063	89.063
95 kPa	83.594	83.594	87.109	87.891	85.938	92.188	91.797	92.188	92.578	94.922	96.875	96.094	94.922	91.797	91.797	91.797
100 kPa	83.984	83.984	87.109	87.891	87.109	96.094	93.750	92.969	94.141	94.141	96.875	96.094	94.922	91.797	91.797	91.797

表 7-2 是空燃比标定试验结果表格示意，它是以转速为横坐标、油门开度为纵坐标的三维表格。

表 7-2　空燃比标定试验结果

转速/(r/min) 油门开度/%	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
0	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6
10	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6
20	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6
30	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6
40	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.1	14.0
50	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.0	13.8	13.6
60	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.0	13.8	13.6	13.4
70	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.0	13.8	13.6	13.4	13.0
80	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.0	13.8	13.6	13.2	13.0	12.8
90	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	13.8	13.6	13.4	13.0	12.8	12.6
100	14.6	14.6	14.0	13.8	13.6	13.4	13.2	13.2	12.8	12.8	12.5

关于电控汽油内燃机喷油量匹配标定的进一步内容可参考有关内燃机匹配论文[3-6]等。

2. 点火提前角 MAP 图的制取

点火提前角 MAP 图主要是制取各种转速与负荷的稳态工况下的点火调整特性，向内燃机提供一个基础点火提前角。点火提前角的确定可参考式(7-2)：

$$\begin{aligned}\text{点火提前角} = & \text{基础点火提前角} + \text{爆震区修正} + \text{怠速稳定修正} + \\ & \text{温度修正} + \text{电压修正} + \text{其他修正}\end{aligned} \tag{7-2}$$

因此，点火提前角 MAP 图的基本标定过程为：

(1) 在内燃机台架上固定内燃机工况(转速和负荷)，在非爆震区域，按确定的优化目标(比如最低比油耗或最佳扭矩)获取基本稳态工况下理想的点火提前角 MAP 图，用于确定基本点火提前角；

(2) 在爆震区域进行试验时，可通过爆震监测设备确定爆震临界点，在爆震临界点内选取基础点火提前角；

(3) 进行针对不同水温、气温、大气压力等参数的稳态修正试验，确定修正曲线；

(4) 进行点火提前角对排放及怠速稳定性影响的试验，以保证怠速稳定，当怠速转速超过目标转速时减小点火提前角，低于目标转速时增大点火提前角，最终确定怠速修正曲线。

图 7-9 表示了点火提前角标定的基本过程，图示为两种进气歧管压力下，点火提前角标定曲线。

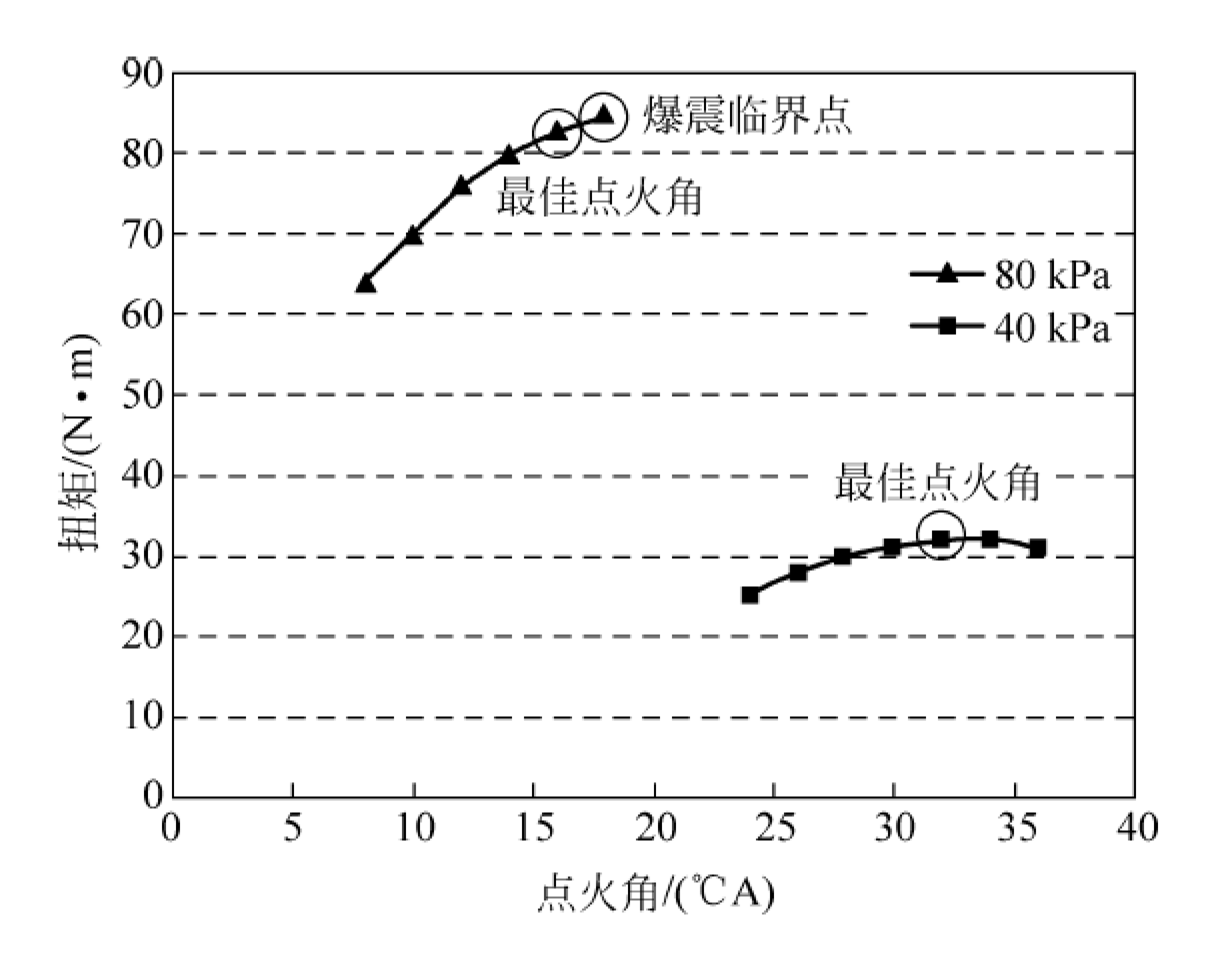


图 7-9 点火提前角的标定方法

需要注意的是不同工况下标定点火提前角时,其优化的准则可有适当的侧重。例如,在汽油机暖机怠速时,点火提前角的设定应优先考虑提高怠速稳定性与减少怠速油耗,在汽油机冷机怠速时,应考虑降低排放;在部分负荷工况下,点火提前角的设定主要考虑降低燃料消耗及排放,并提高驾驶性能;在全负荷工况下,点火提前角的设定重点是提高汽车行驶时的动力性、防止排温过高和避免产生爆震;在加速工况下要注重在加速状态下可能出现的爆震现象,提高驾驶动力性和平顺性。为获得更加精确的点火提前角,需进一步考虑其他修正系数如动力加浓修正、减速断油修正和加速修正等。如图 7-10 所示为某汽油机点火提前角 MAP 图。

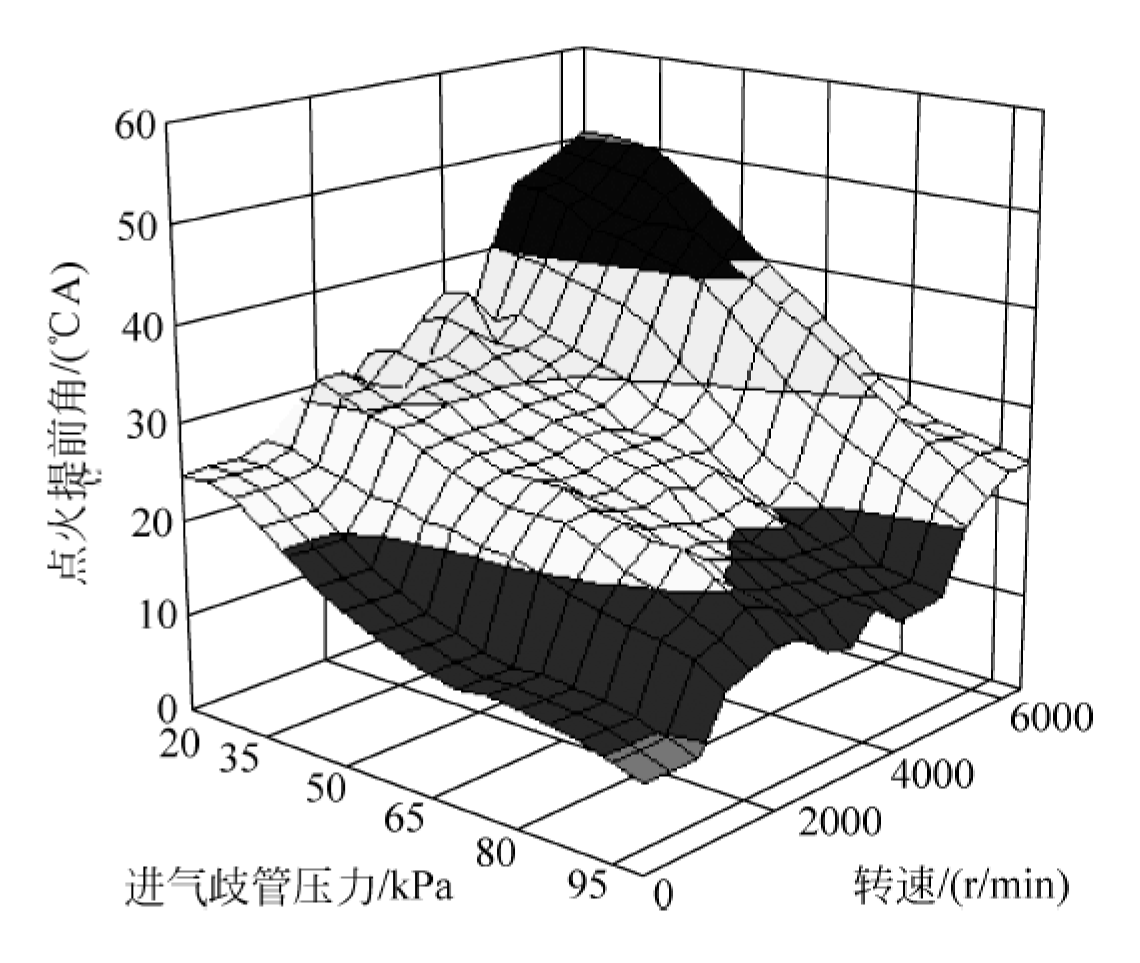


图 7-10 汽油机点火提前角标定结果

3. 扭矩模型 MAP 图的制取

为了满足日益严苛的排放和油耗法规要求，各类新技术(比如电子节气门、VVT、EGR和缸内直喷等)越来越多地在汽油机上普及应用。随着新技术的应用，所需标定的控制参数大幅度增加，导致标定工作量、周期和费用成倍增长，完全依赖经验的试验优化方法难以满足要求，而基于模型的标定技术是解决该问题的有效手段。

图 7-11 所示的是基于扭矩模型控制示意图，从图中可看出从驾驶员指令输入(油门踏板信号)到汽油机实际扭矩输出都是通过扭矩模型来精确控制。此外，通过扭矩预估模型还可以根据转速、进气流量、点火提前角、空燃比等汽油机运行参数，得到汽油机实际扭矩输出，从而为其他整车控制模块提供扭矩输入(如 ABS、ESP、TCU 等)。

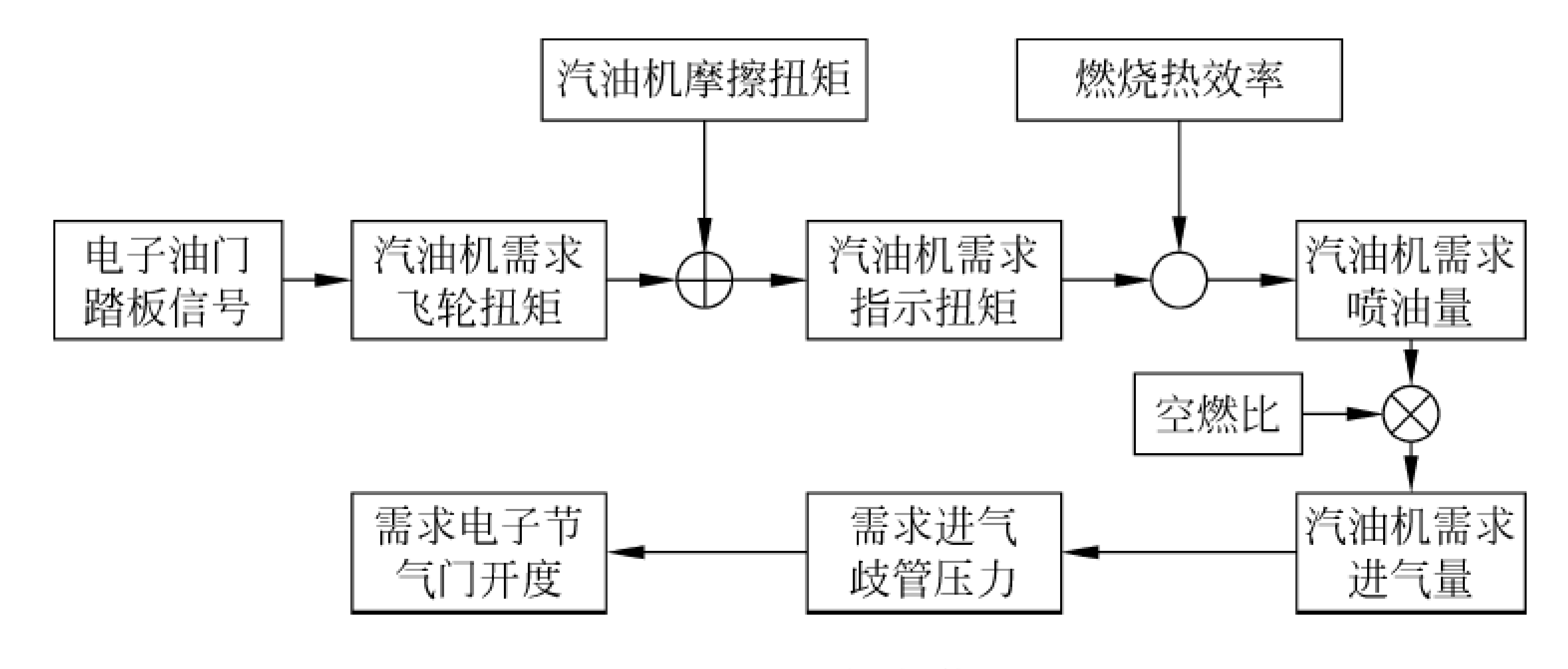


图 7-11　扭矩控制模型

扭矩模型确定方法可根据式(7-3)确定：

$$\text{汽油机输出扭矩} = \text{燃油喷射量} \times \text{燃油热值} \times \text{理论热效率} \times \text{空燃比效率修正} \times \text{点火提前角效率修正} - \text{机械摩擦扭矩} - \text{泵气损失扭矩} \tag{7-3}$$

从式(7-3)中可看出扭矩模型主要由机械摩擦扭矩、泵气损失扭矩、理论热效率和点火提前角效率修正 MAP 图等构成，以上几个 MAP 图都是扭矩模型中重要的 MAP 图。

机械摩擦损失和泵气损失的标定方法可以参见本书 4.5 节的介绍。这里简要介绍燃烧热效率和相关修正值的标定方法。

理论热效率确定方法如下：

式(7-3)中的理论热效率是指在理论空燃比及最佳点火提前角时的热效率，是汽油机转速、负荷百分比相关 MAP 图。标定时根据燃烧分析仪和台架中测量得到的指示平均压力、燃油消耗量和实际空燃比等数据，根据式(7-3)进行计算可得出理论热效率。图 7-12 为某汽油机的试验结果。

不同的空燃比和点火提前角对实际热效率有较大影响，因此需要对式(7-3)中修正值进行标定。空燃比修正标定时以一定步长调节空燃比从 10 逐步变化到 16，测量不同空燃比情况下的指示平均压力、喷油量和点火提前角等，并计算得到对理论热效率的修正值。图 7-13 所示为某汽油机试验结果。

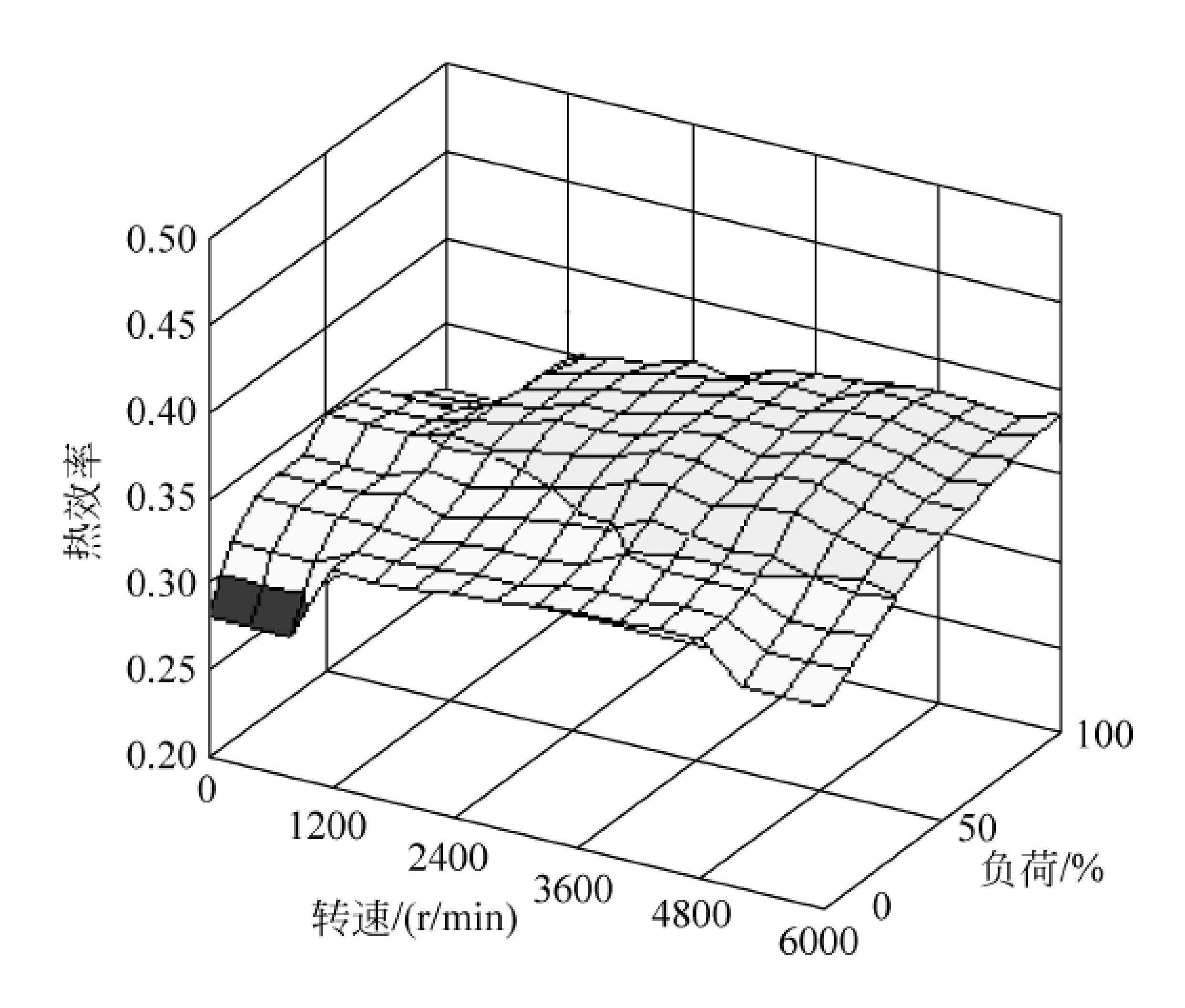


图 7-12 理论热效率 MAP 图

点火提前角修正的标定步骤为，选取若干个汽油机中低转速和负荷点，固定油门，点火提前角以一定步长从最佳点火提前角（扭矩最佳）逐步减小，记录指示平均有效压力和喷油量等台架数据，根据相关数据计算得到实际点火提前角与最佳点火提前角的差值对热效率的修正值（某汽油机的试验结果如图 7-14 所示）。

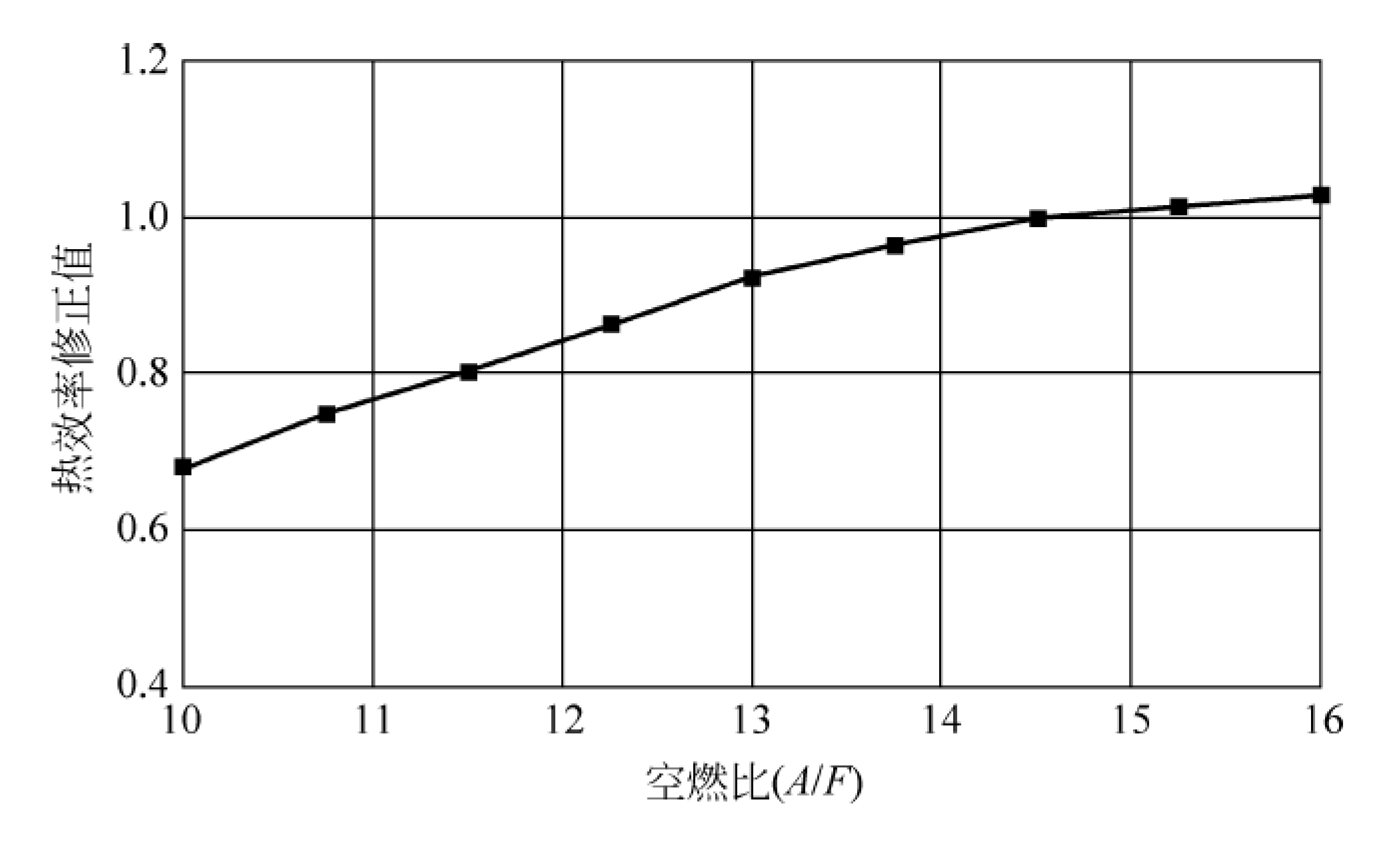


图 7-13 空燃比对热效率修正 MAP 图

整个扭矩模型标定完成后，还需进行汽油机全工况运行检查，以核对模型预测与扭矩实测值是否一致，误差较大（例如大于 5%）的点还需对相应标定量进行适当微调。

4. 可变气门正时（VVT）系统标定

在油耗和排放等法规越来越严苛的背景下，可变气门正时（VVT Variable valve

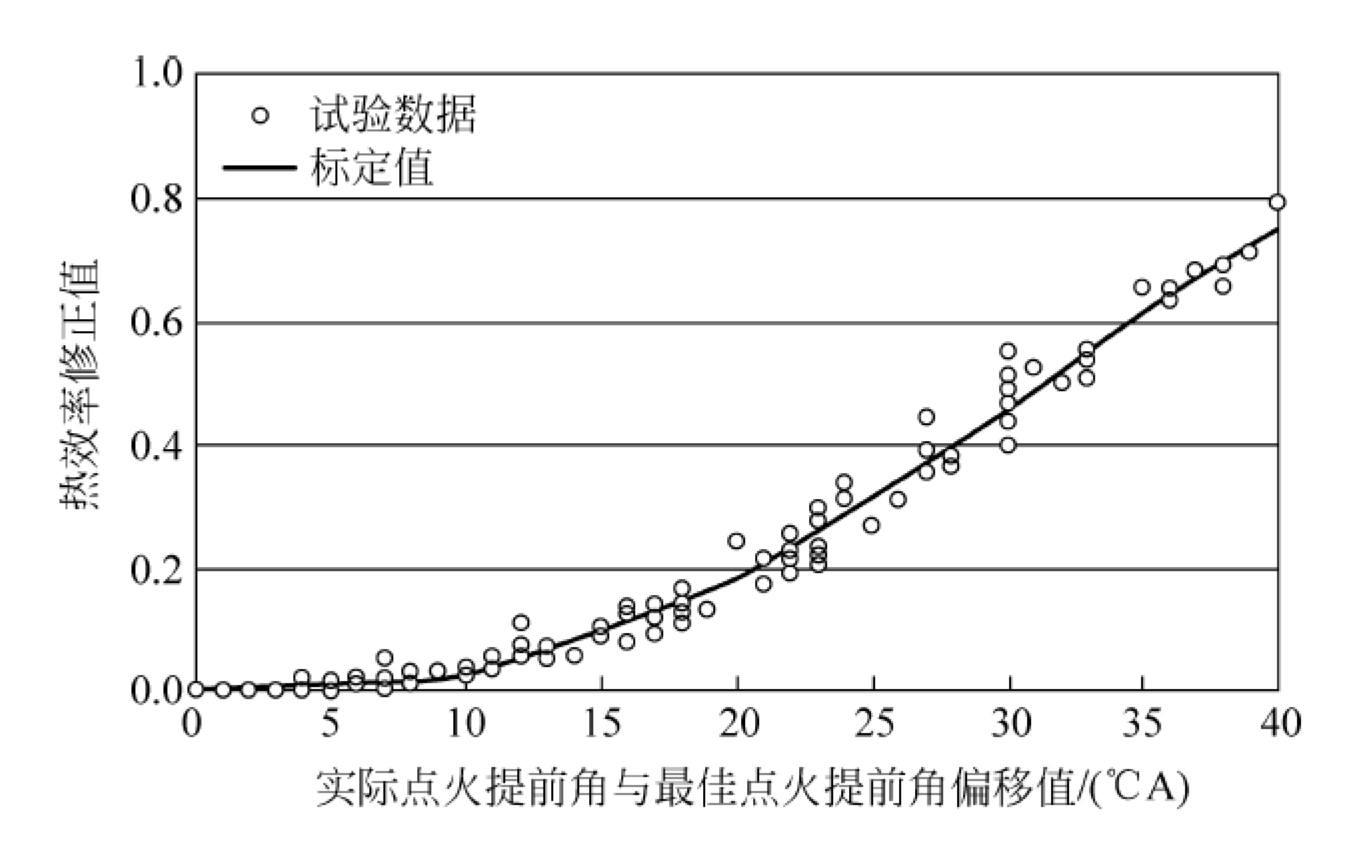


图 7-14　点火提前角对热效率修正 MAP 图

timing，以下简称 VVT）系统作为一种有效的技术方案越来越多地在汽油机上得到应用。顾名思义，VVT 系统是在汽油机不同工况下通过适时调整进气门或排气门的正时相位，来实现最佳的排放、油耗及动力性等指标。VVT 系统的标定内容主要包括 VVT 最佳相位的选取、相位控制器的控制和相关修正量的标定（包括点火提前角补偿、充气效率补偿等），其中 VVT 相位的选取是最重要的标定内容，本节重点介绍单进气 VVT 系统的相位选取过程。图 7-15 为进排气相位示意图。

在 VVT 进行相位选取时，首先需要考虑汽油机处于何种工况，即汽油机在不同工况区域有不同的 VVT 相位选取原则。以图 7-16 为例进行简要说明。当汽油机在低转速的区域①内，由于机油压力低于 VVT 工作压力，因此 VVT 系统不工作；在中低负荷区域②，VVT 相位选取以最佳油耗为原则；在汽油机外特性附近区域③，VVT 相位选取以最佳扭矩为原则；在高速大负荷区域④，由于排温较高，为保护排气系统和三元催化器，一般以降低排温为选取原则。

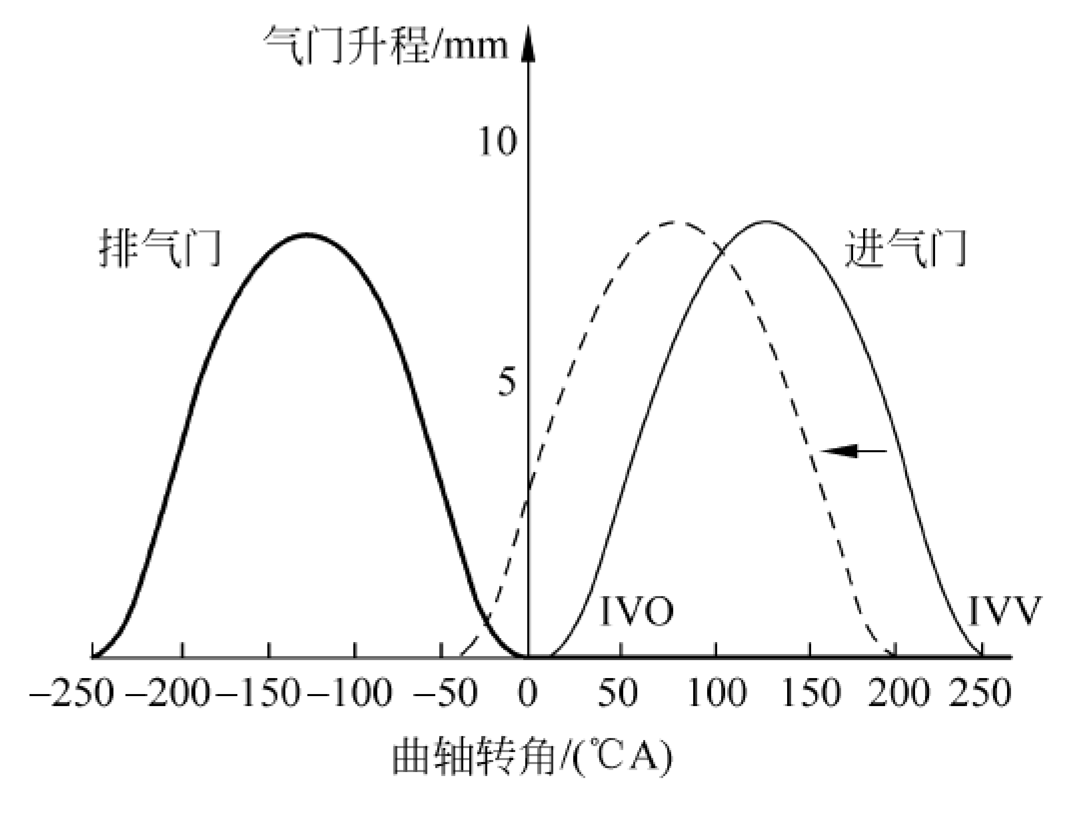


图 7-15　进排气门相位示意图

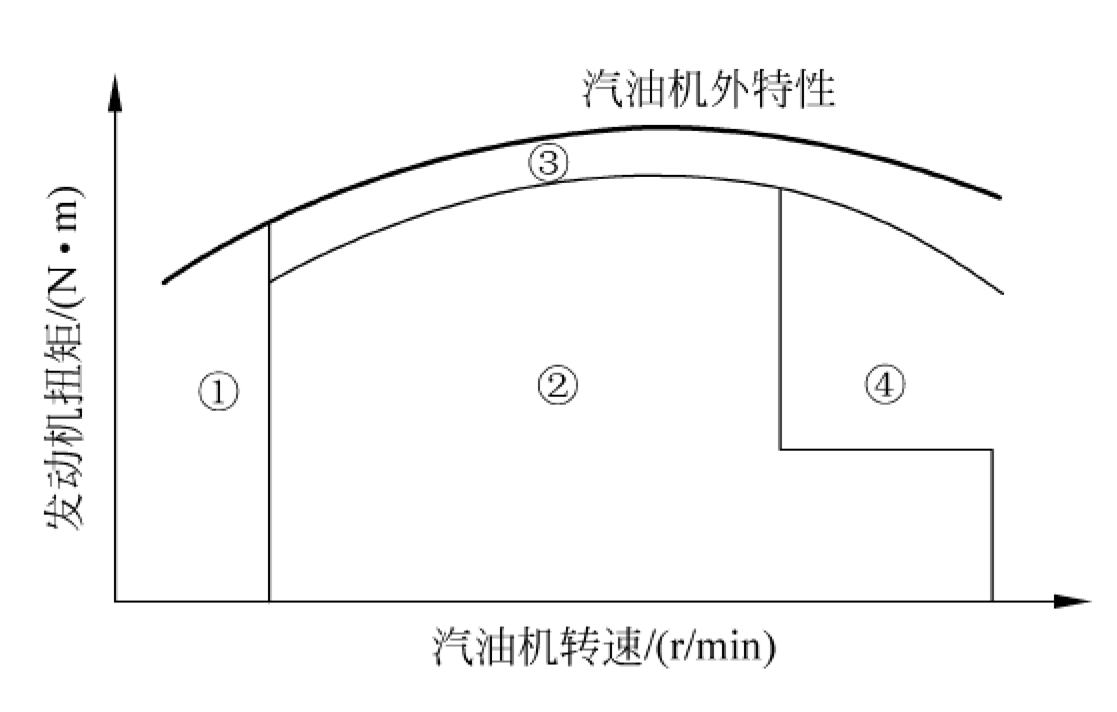


图 7-16　不同工况区域的 VVT 相位选取原则

汽油机在区域②和区域③标定的基本过程如下：

1）在区域②标定

试验步骤是首先固定汽油机转速和负荷，从 VVT 基准相位点开始，调整点火提前角至最佳值，记录试验台架数据。以一定的步长增加 VVT 相位到下一个节点，控制汽油机至同一负荷，并且调整点火提前角至最佳值，记录试验台架试验数据，以此类推完成所有 VVT 节点的试验数据记录工作。根据试验数据选取最低油耗对应的 VVT 相位，如在排放循环的常用工况点还需考虑选取排放较佳的 VVT 相位。同时试验过程中还需注意燃烧稳定性应始终满足标定要求。

2）在区域③标定

试验步骤为固定汽油机转速和负荷（或全油门），VVT 试验步骤同区域②标定。调整点火提前角至最佳值，选取扭矩最佳的相位作为最后标定值。最后 VVT 相位标定结果如图 7-17 所示。

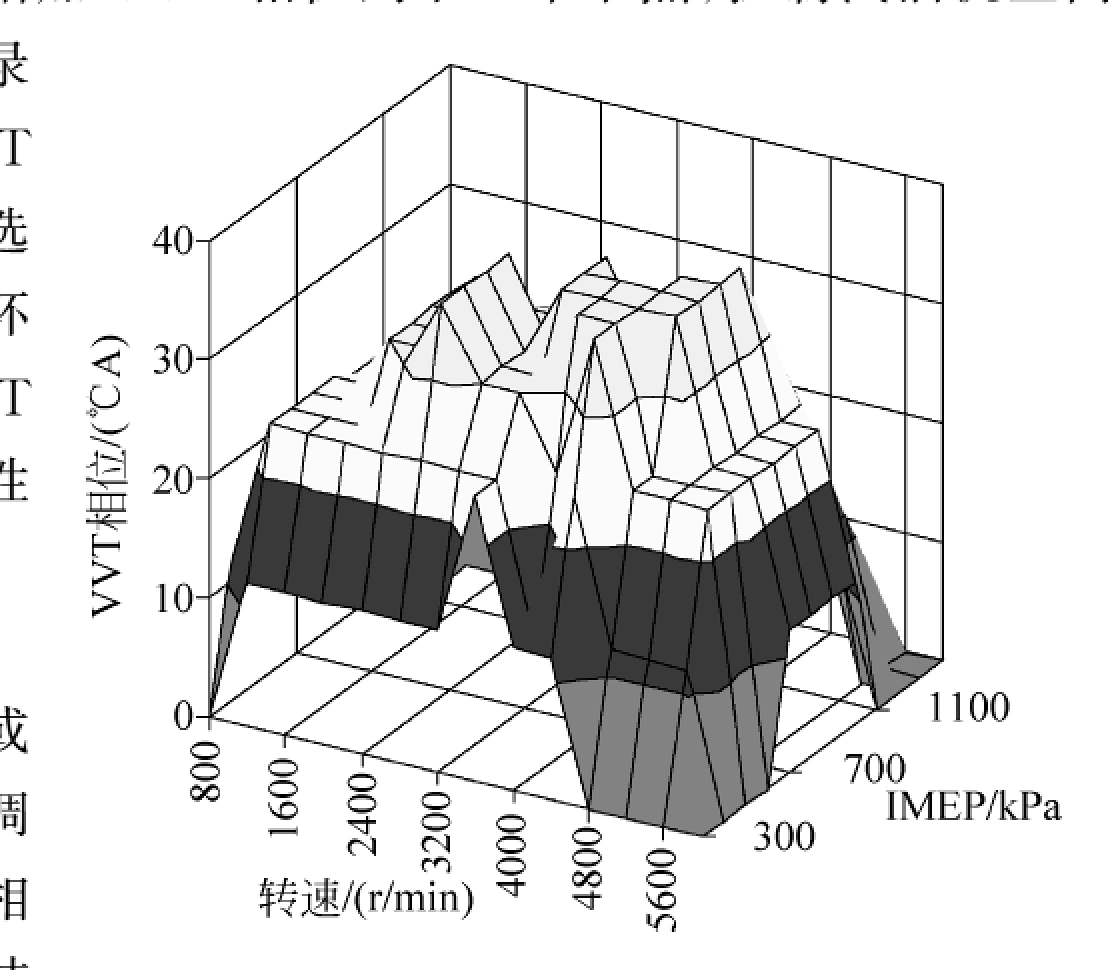


图 7-17 某汽油机的进气 VVT 相位标定结果（其中 IMEP 为平均有效压力）

7.5 电控柴油机标定试验

柴油机电控管理系统 MAP 图的标定与汽油机类似，一般也分为两个步骤：一是在柴油机台架上进行所有 MAP 图的基本标定；二是整车道路试验的进一步 MAP 图优化。本节重点介绍电控管理系统标定。

为了更好地理解柴油机的标定问题，首先需了解电控柴油机的控制方式。目前电控柴油机的控制方式大致有三种：①脉宽控制法；②油量控制法；③扭矩控制法。图 7-18～图 7-20 分别表示了这三种控制方式的特点。

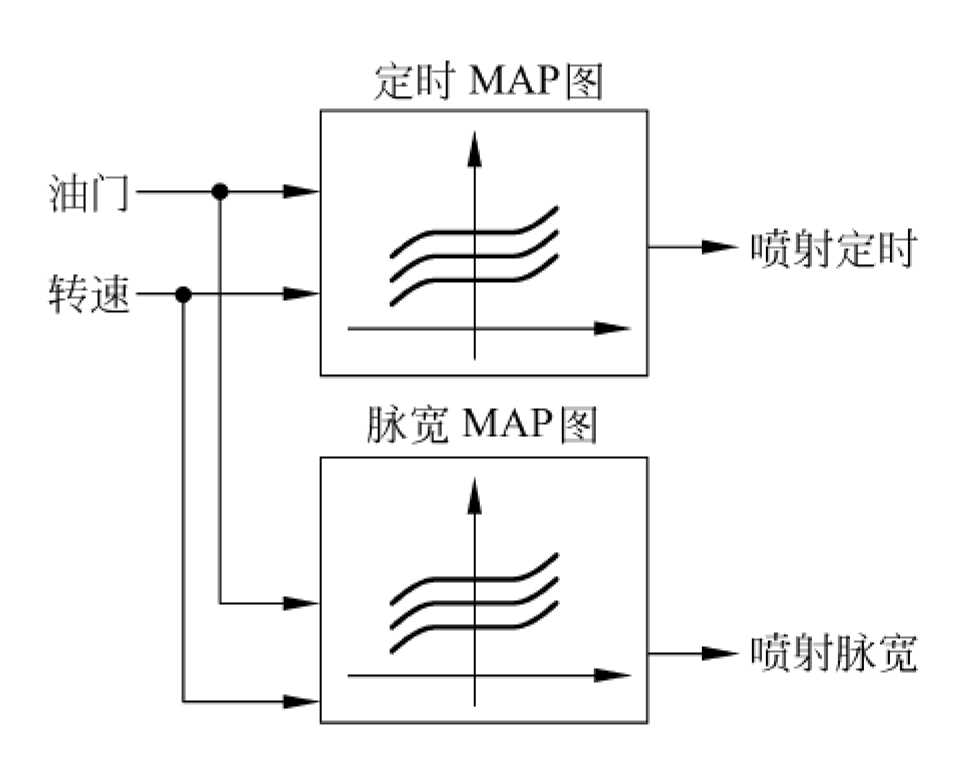


图 7-18 基于时间的控制方法

图 7-18 是基于时间的控制方法，即脉宽控制法，是根据驾驶员踏板（油门）位置和转速直接查 MAP 图，求出该状况下柴油机的喷射脉宽和喷射定时来进行控制。此方法只适用于同类型的喷射部件，通用性差，对产品的一致性要求很高。

图 7-19 的油量控制法是由驾驶员踏板（油门）位置直接确定油量 MAP 图。具体步骤是先根据驾驶员踏板（油门）位置和转速直接查 MAP1 和 MAP2 图，求出该状况下柴油机的总喷射油量

和预喷油量。总喷油量包括主喷油量和预喷油量，由此得到主喷油量。通过主喷油量和转速再查 MAP3 图得到主喷定时。又由主喷油量和轨压查 MAP4 图得到主喷脉宽。最后按图上所示箭头方向查出预喷定时、预喷脉宽、轨压控制前馈流量（应用于共轨系统流量控制阀）和目标轨压等值。该方法优点是简单明确，缺点是柴油机和整车作为整体一起分析，柔性差，不能适应车型的变化。当车型或柴油机附加零件变化时，必须更改油量图和其他的参数。

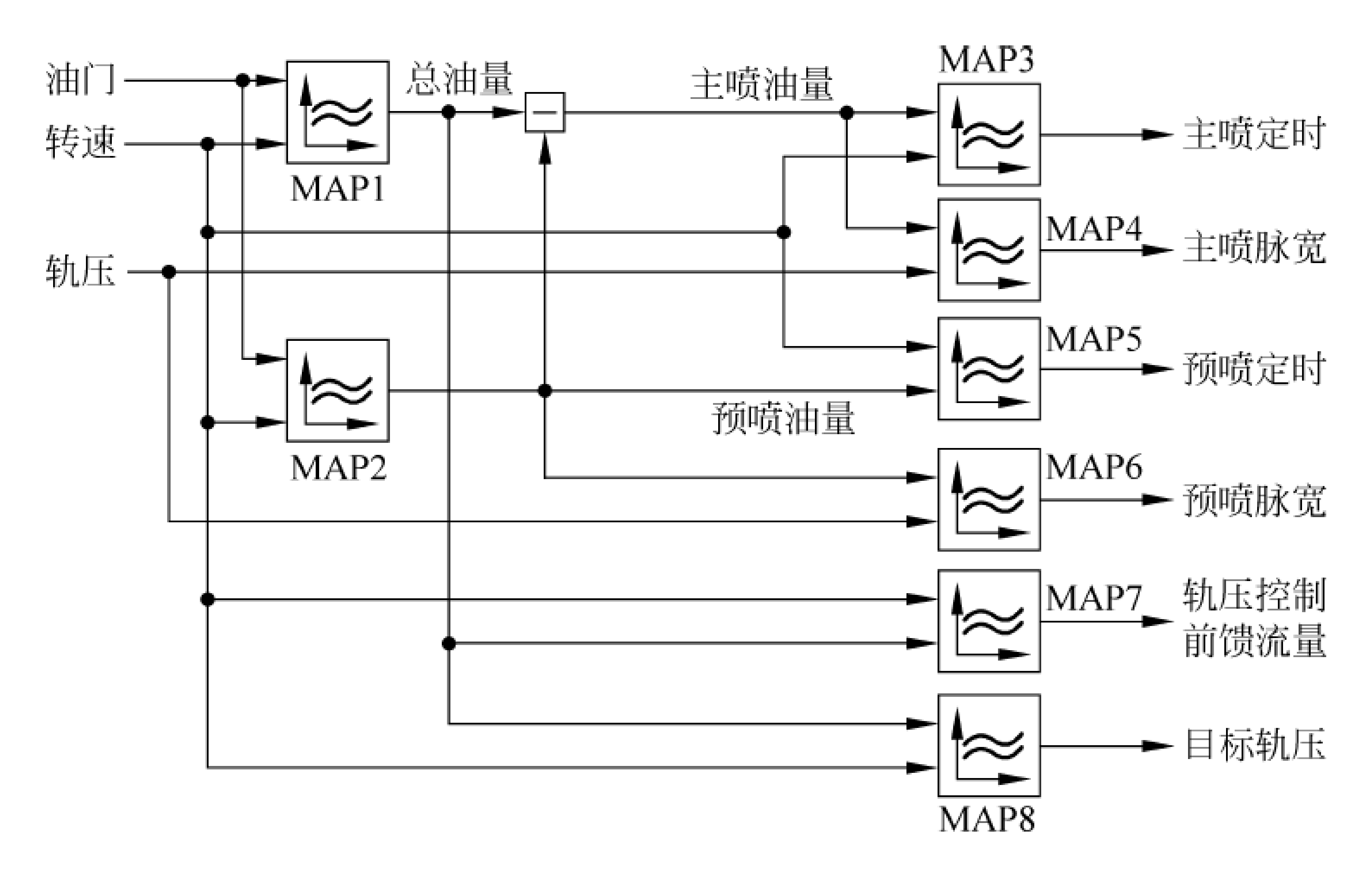


图 7-19　基于油量控制方法（共轨主框架图）

图 7-20 表示的是第三种方法——基于扭矩控制方法。油量的确定是通过油门获得扭矩（MAP1 图），加上摩擦扭矩（MAP2 图）和附件扭矩（根据柴油机状态由附件扭矩模块计算得到）后得到总扭矩；再通过扭矩油量转换图（MAP3 图）转换为总油量；之后根据转速查 MAP5 得到当前油量限制；其他参数的获得与基于油量控制方法基本相同，通过限制后总油量、预喷油量、转速和轨压可分别确定（得到）主喷油量、主喷定时、主喷脉宽、预喷定时、预喷脉宽、轨压前馈流量和目标轨压。此方法可更加方便地更改各种参数，对于柴油机匹配不同的车型，只需要对动力扭矩 MAP 图进行修改即可。这样对于不同驾驶需求车型的标定，仅需很少的改动即可满足要求。比如，公交车需要的是平顺性高，则油门对应的扭矩曲线就要平滑；如果要求的加速性能高，对应的曲线斜率就要大一些。由于扭矩控制法通用性好，柴油机在匹配不同的车型及零部件时，工作量可减少。

下面以非共轨柴油机的稳态油量 MAP 图和稳态定时 MAP 图的标定方法为例进行介绍。

1. 稳态油量 MAP 图的标定

各工况稳态油量由转速、油门和喷油量或喷油脉宽构建的三维 MAP 图表示。这是油量的基本（或主控）MAP 图。柴油机正常运转时，根据当前的转速和油门开度，在该 MAP

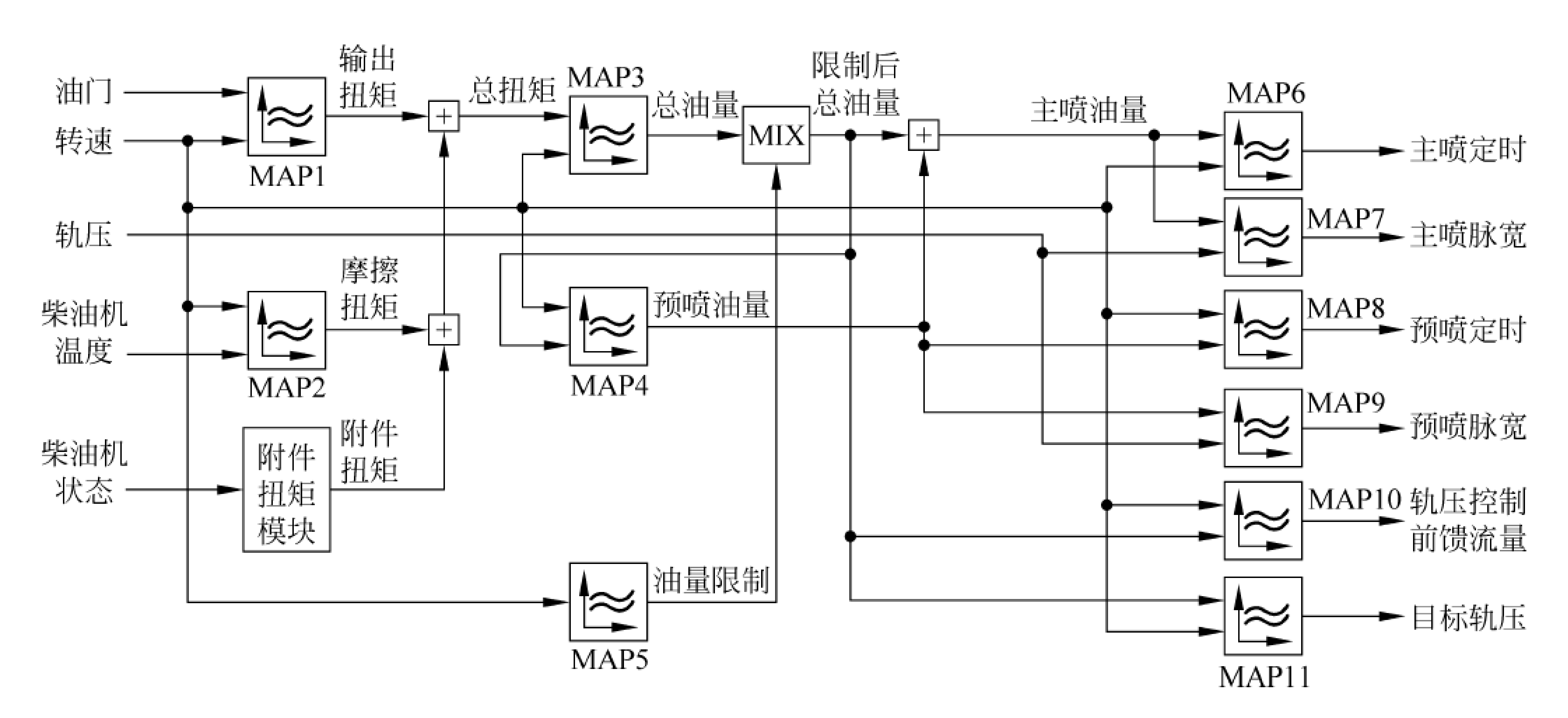


图 7-20 基于扭矩控制方法(共轨系统)

图中查表并插值计算出所对应的基本(或主控)喷油量(喷油脉宽),然后进行修正并与限值进行比较,得到最终喷油量(喷油脉宽)。稳态油量 MAP 图的匹配标定主要步骤如下:

(1) 根据配套厂家对外特性提出的动力性、经济性要求(实际为标定点、最大扭矩点以及扭矩储备等指标),可初步确定柴油机的外特性线,进而估计出各转速所需的最大循环喷油量,再由油泵测试得出油量与脉宽的换算关系,来确定外特性线上的脉宽值。之后,按全程调速的方式,根据所配套车型对运转稳定性、乘用舒适性以及加速性能的要求,初步确定各油门位置的等油门线,即各油门位置的调速特性线,定出该线在外特性线上的起始转速和曲线走向。这样就粗略地制作出一张控制油量 MAP 图。此图外特性的最大油量要比实际外特性所需的油量大,以便于进行外特性功率的调整试验。图 7-21 为此三维图的二维显示,是油门不变的情况下,脉宽与转速的关系曲线族,即各油门位置都有一条由外特性转为调速特性的油量曲线。最大油门位置时,为外特性线加上额定转速时快速下降的调速线。脉宽指的是喷油持续期对应的曲轴或凸轮轴转角(常用曲轴转角),简称喷油脉宽。

(2) 进行不同调速特性线的实际斜率标定试验,具体确定等油门线各点的油量变化率,也就是油量线各点的斜率。尤其要关注低速小负荷区域,因为此区域内柴油机的油量不均匀性较大(油泵系统存在非线性异常),不合适的油量变化率很容易造成转速波动过大,甚至发生游车和抖动现象。图 7-22 为目标转速 740 r/min 下,当负载有变化时,两种喷射油量变化率的转速波动曲线,可以看出,油量变化率较大的等油门线,在过渡到负载变化后的新平衡位置时,转速波动十分严重,而变化率较小的曲线的转速波动较小。

(3) 在图 6-6(a)的排放控制区内,进行柴油机排放法规工况全局优化的标定试验,直到稳态排放测试值满足排放法规的要求为止。根据排放标定的结果,确定控制区内的外特性线油量及怠速点油量。根据柴油机厂家对额定点调速率及综合性能的要求,做其他区域工况的标定试验,确定低速和高速区域的外特性油量。

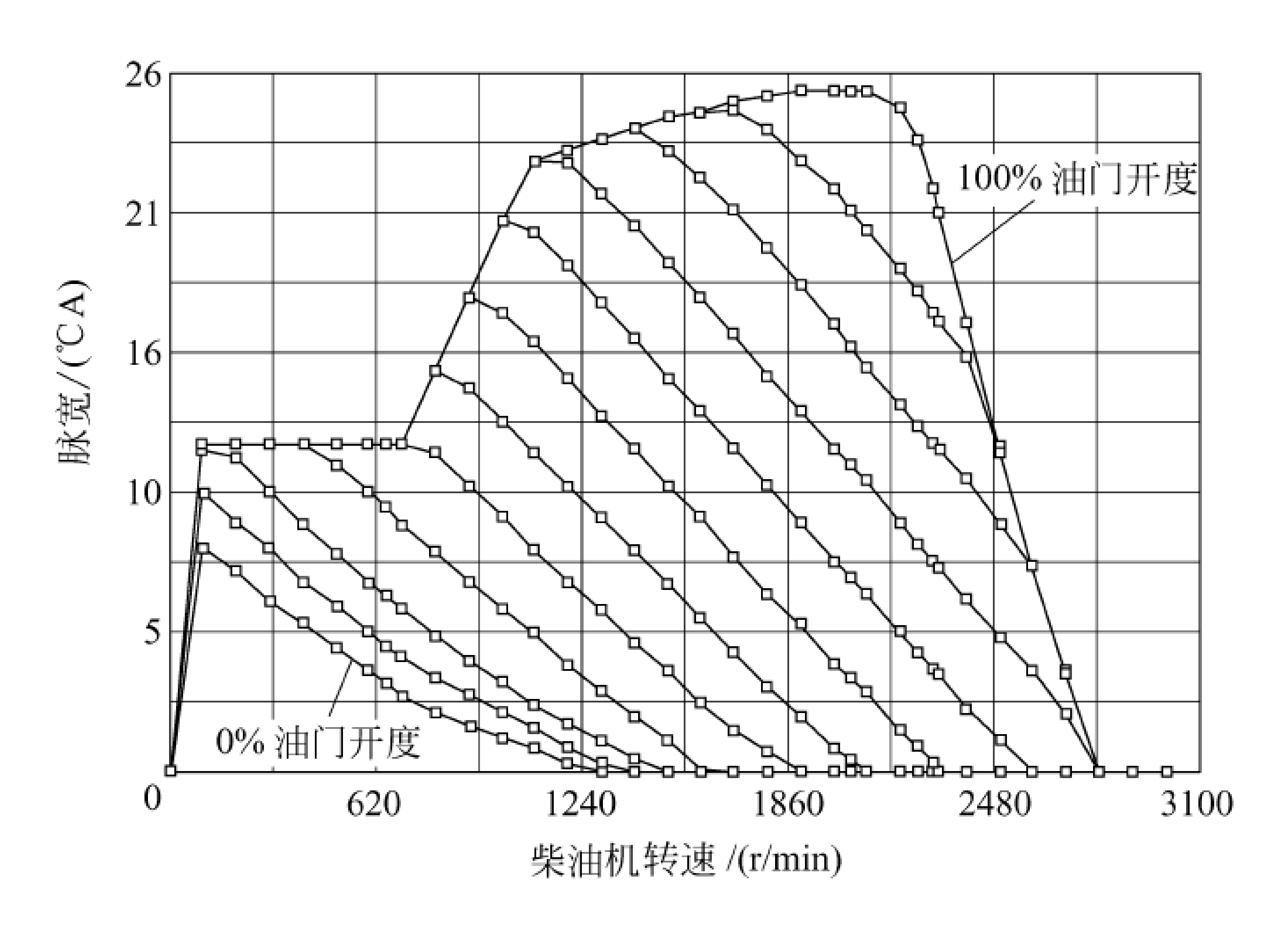


图 7-21　初始主控油量 MAP 图

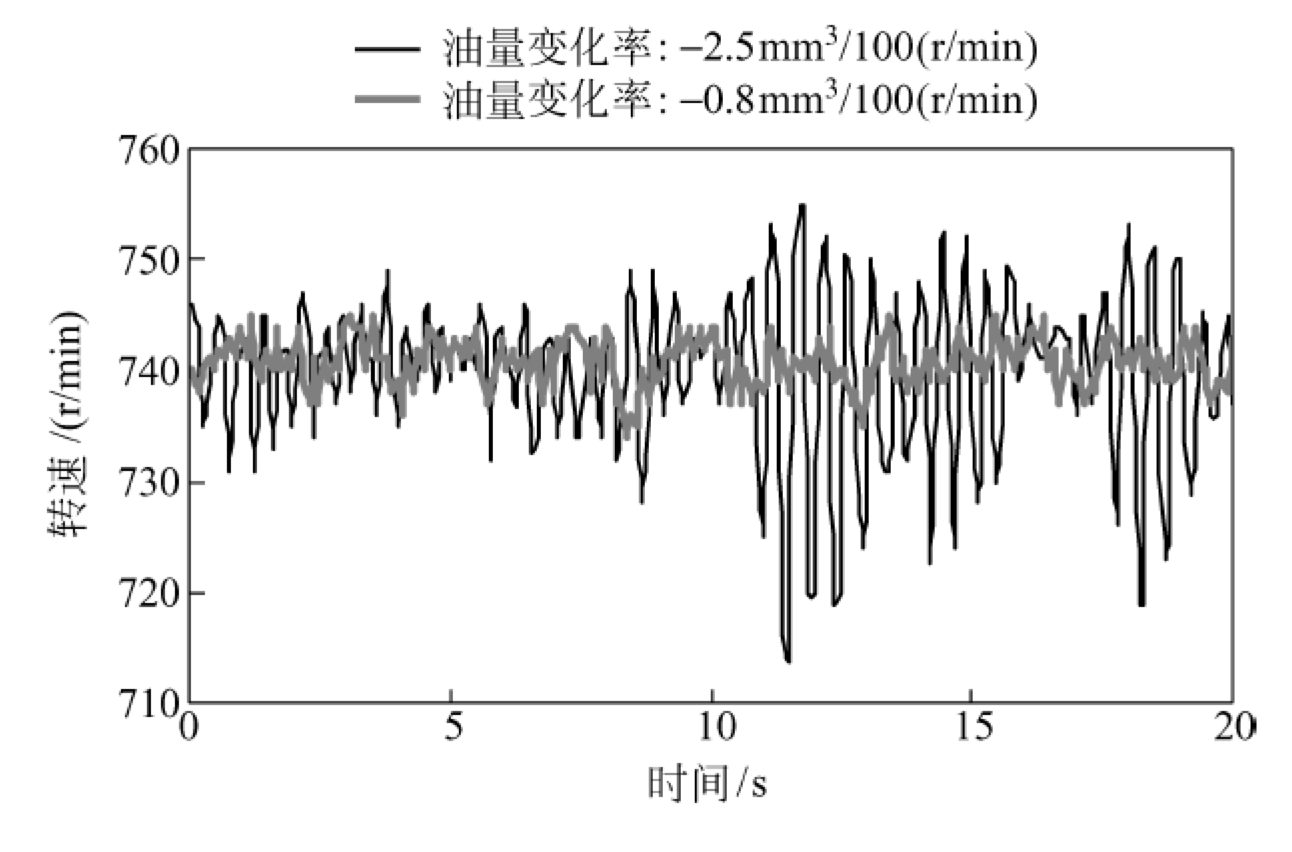


图 7-22　低转速时油量变化率对转速的影响

(4) 以上获得的是基本喷油量 MAP 图。如同汽油机一样，还要进行各种状态及调整参数的修正标定试验，求得修正 MAP 图或经验公式，存储于 ECU 中。图 7-23 表示的是某电控柴油机目标喷油脉宽产生过程的简图。

这样，油量 MAP 图台架标定工作就完成了。图 7-24 为某柴油机匹配标定出的喷射脉宽 MAP。

2. 稳态工况喷油定时 MAP 图的标定

同油量 MAP 一样，稳态工况喷油定时 MAP 图也是一个三维结构图，由转速、油门、喷油定时组成。由当前的转速和油门开度即可通过查该 MAP 图得到柴油机的当前基本定时。稳态喷油定时 MAP 图的标定主要步骤如下：

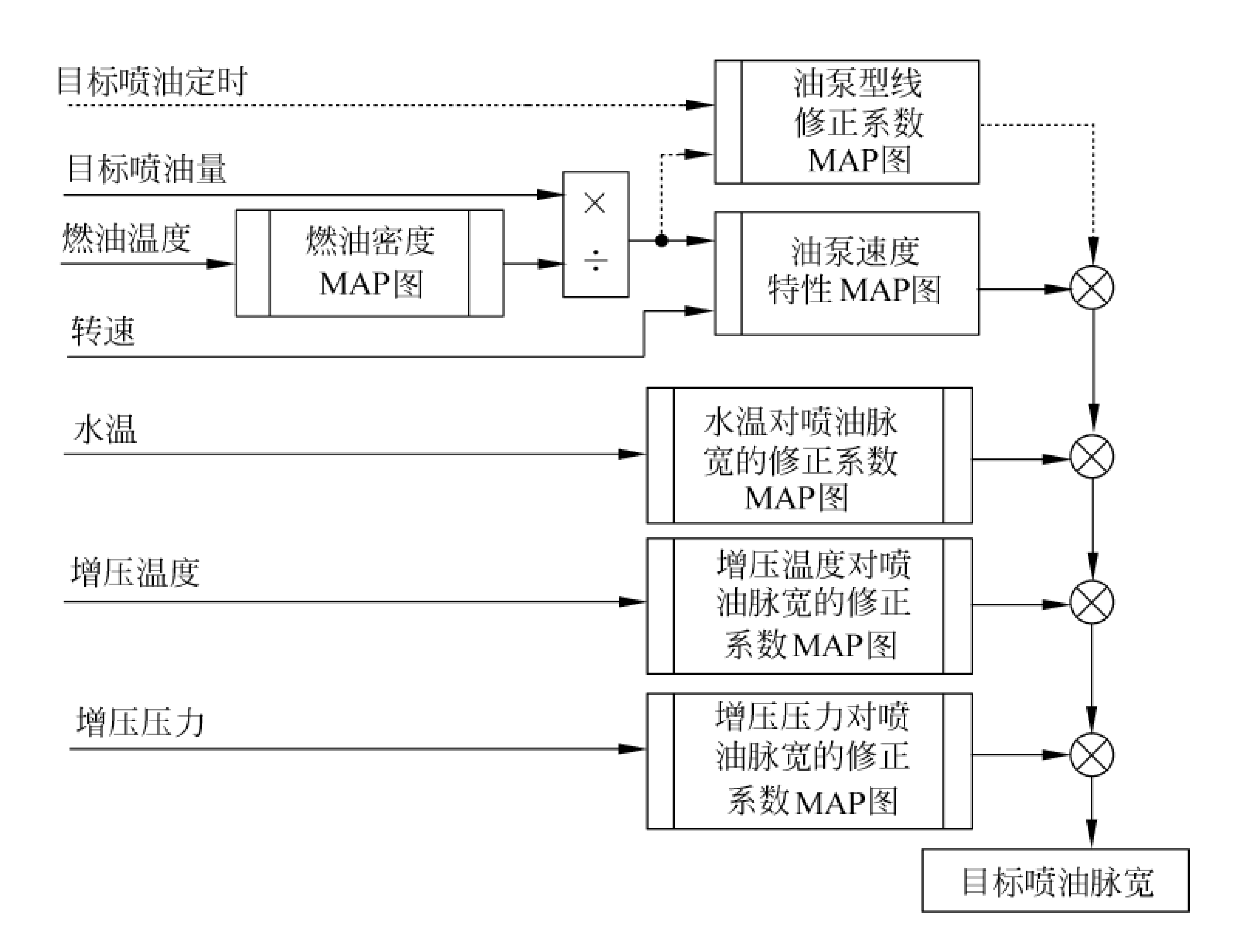


图 7-23 某电控柴油机目标喷油脉宽产生过程示意图

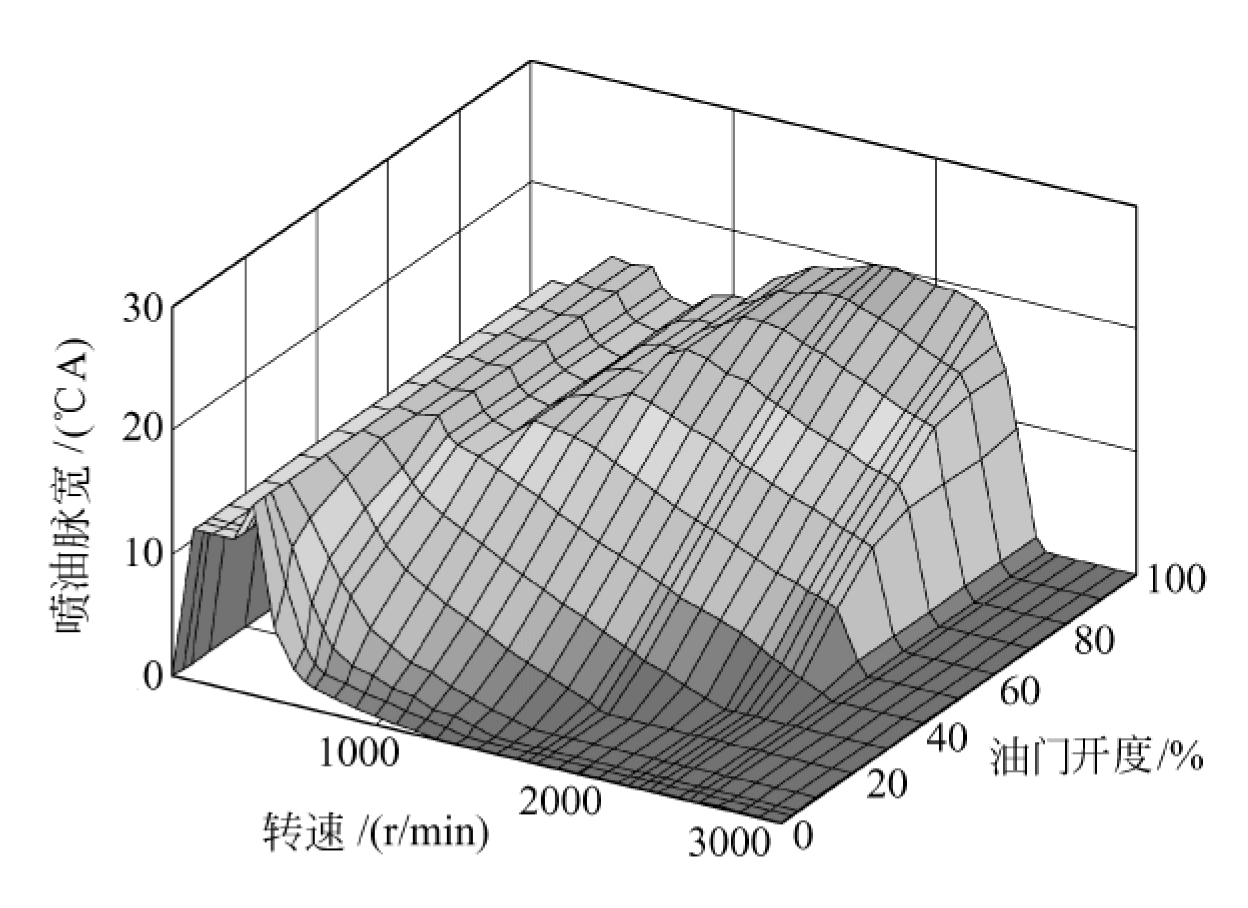


图 7-24 某柴油机喷油脉宽 MAP 图

(1) 根据经验,在 MAP 图中给出一个合适的定时初值,使柴油机能够正常起动运转。

(2) 用在线修改的方式,进行排放法规工况控制区的匹配标定,使稳态 ESC13(用于重型柴油机排放测试循环)模拟计算值达到排放法规的要求。之后进行非排放控制区的性能匹配标定,根据厂家要求的动力性、经济性以及烟度限值,每间隔 100 r/min(或根据具体情况而定)做负荷特性点的定时优化试验,找到最佳喷油定时。低速非控制区负荷特性优化标定做到最低怠速(如 600 r/min,根据试验对象确定),高速非控制区的负荷特性点应做到标定转速(如某柴油机为 2200 r/min),超过标定转速之后的调速区可根据标定转速下的优化

喷油定时值适当加大,即可作为其喷油定时。

(3) 对没有数据的区域按相邻点的简单插值计算结果填入 MAP 图。图 7-25 为某电控柴油机标定出的稳态定时基本 MAP 图。

(4) 试验确定各种修正 MAP 图或经验公式等,图 7-26 为某柴油机目标喷油定时产生过程示意图。

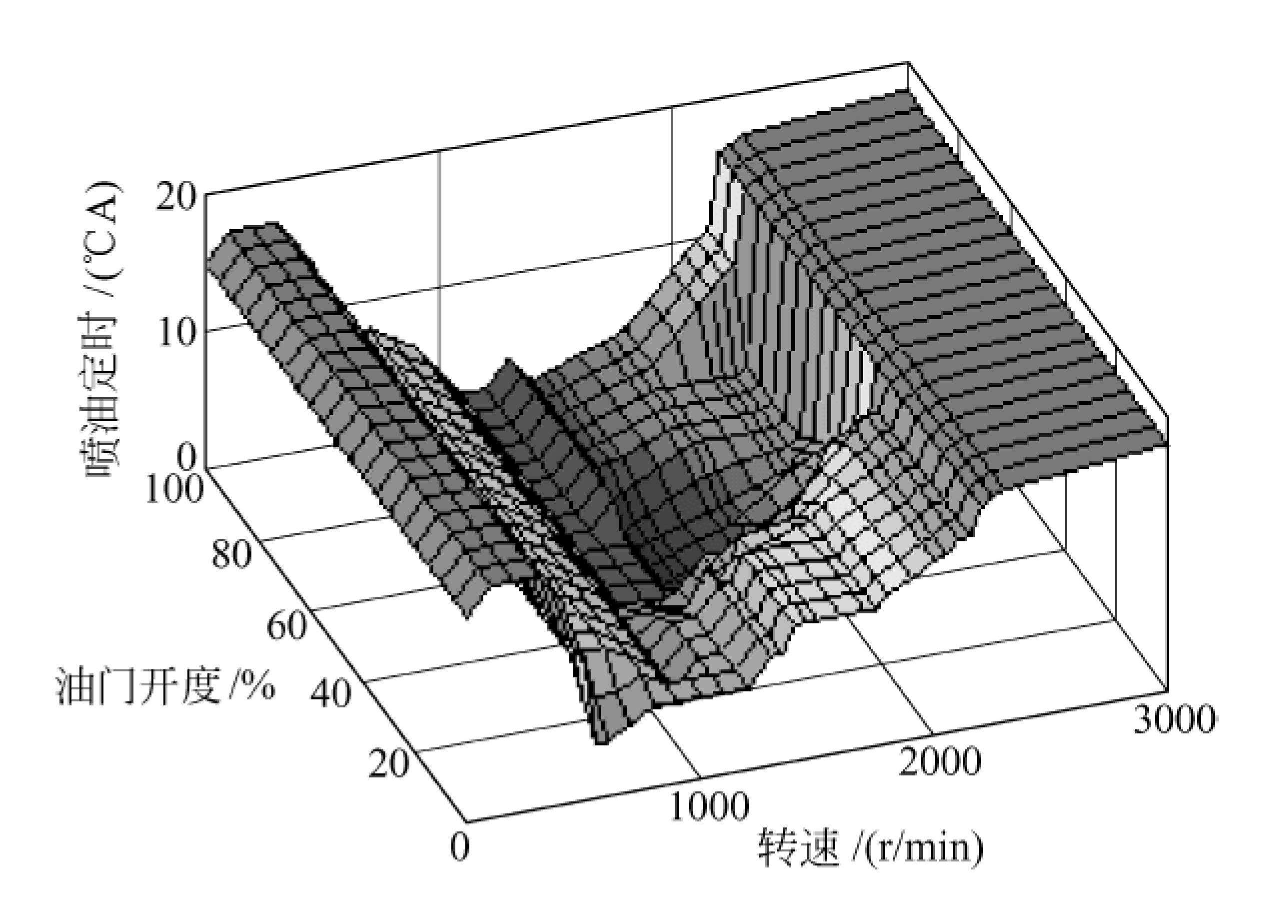


图 7-25　某柴油机稳态定时基本 MAP 图

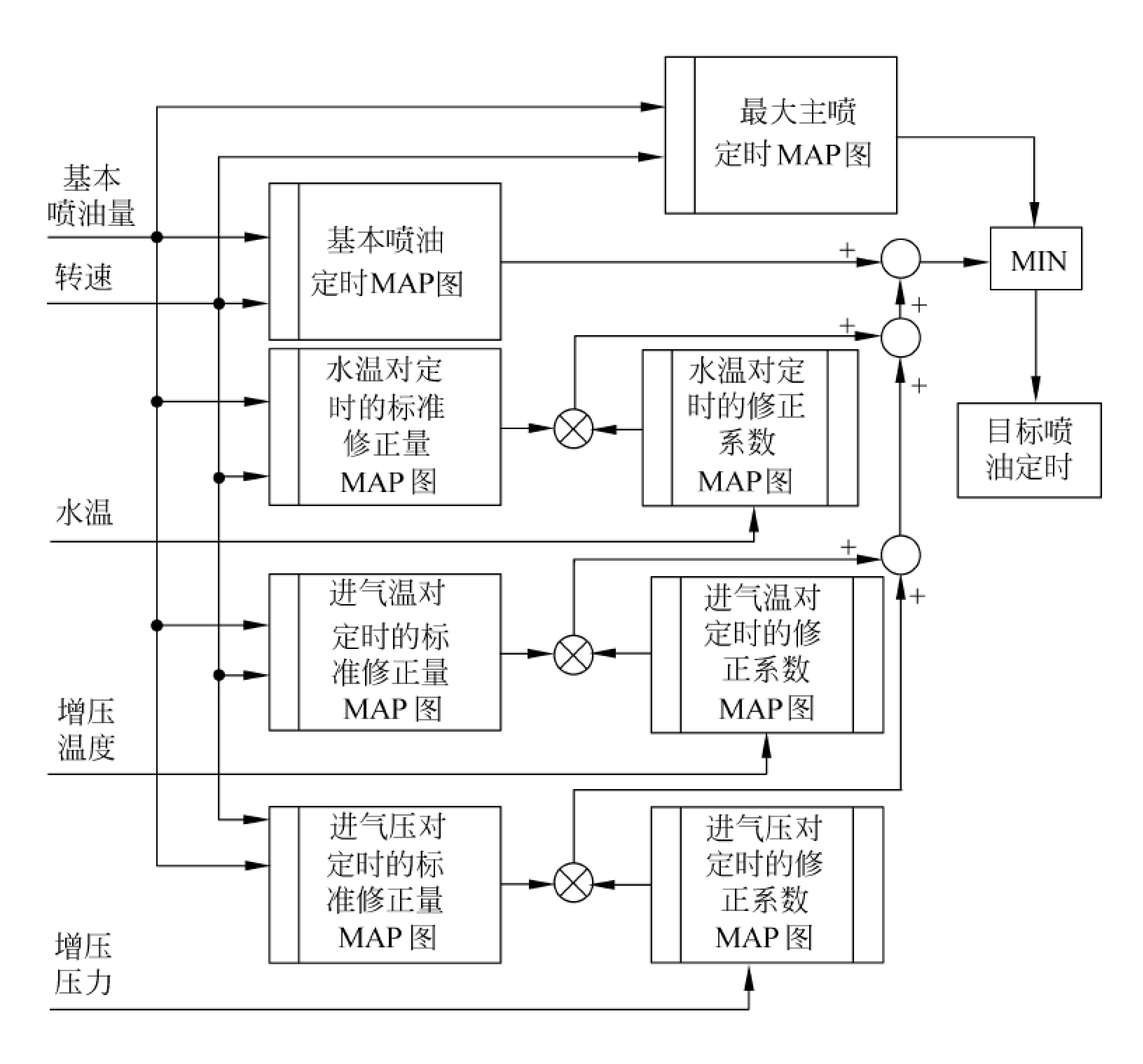


图 7-26　某电控柴油机目标喷油定时产生示意图

7.6 自动标定系统

内燃机电控系统标定技术的发展是与电控技术的进步相关的。在电控技术发展初期，由于控制系统比较简单，控制参数较少，标定内容也较简单，工作量小。但是随着法规的不断加严、电控技术的不断发展、控制参数不断增多，控制方法越来越复杂。由于标定工作复杂程度的提高和标定工作量的急剧增大，传统标定方法越来越难胜任这一趋势。在这种背景下，自动标定系统孕育而生并且逐渐成为越来越重要的标定方法。

目前比较有代表性的自动标定系统有 AVL 公司的 CAMEO 和 FEV 公司的 TOPExpert。如图 7-27 所示，CAMEO 系统主要由常规标定软件（如 INCA）、CAMEO 自动标定软件、内燃机控制模块 ECU、台架控制系统（如 PUMA）和内燃机台架组成。图 7-28 表示的是自动标定系统的工作流程。从图中可看出，第一步是从 ECU 下载 MAP 数据到自动标定软件内。第二步，进行试验设计，为提高试验效率和建模精度，可利用系统内的（Design of Experiment，DoE）工具对试验工况点和控制参数进行优化选择，并且对试验的边界条件（比如燃烧稳定性、爆震、排温等）进行确定。第三步，按照 DoE 的结果进行运行试验，系统自动控制 PUMA 系统和标定应用软件完成内燃机各个工况点和 ECU 控制参数下的试验及测量任务。第四步，完成初步试验后，对试验结果进行分析检查，剔除测量奇异点，补测遗漏点，确保数据完整后，利用系统内建模工具进行控制参数（如 VVT 角度、EGR、点火提前角、轨压和喷油时刻等）对内燃机性能指标（如比油耗、扭矩和排放值等）影响函数的建模。标定工程师可以选择不同方法对试验数据进行建模，较常见的方法有高级多项式法、快速神经元网络法和智能神经元网络法等。建模工具还可以评估模型精度和可信度。第五步，结合影响函数及优化算法选取最优控制参数值，并最终计算导出标定数据 MAP 图。最后一步，下载 MAP 图到 ECU 内，进行最终的标定数据验证试验。检查内燃机性能是否满足工程开发目标。FEV 公司的 TOPExpert 系统的组成和功能与 CAMEO 类似。自动标定系统能很好地整合所有标定过程，大幅提高了试验效率，同时降低了对试验人员数量的需求。但这也对试验前的 DoE 试验设计及试验室设备的运行稳定性提出了极高的要求。

在自动标定系统中，为了选取最佳的标定控制参数，优化算法的选择非常关键。如前面章节所述，优化方法有局部优化和全局优化两大类。局部优化只关注特定工况点优化，而全局优化则关注整个试验循环（如 NEDC 循环或 FTP75 循环）内工况点的优化。针对具体的优化算法，比较常见的优化算法有梯度法、拉格朗日乘子法、随机试验法（Monte-Carlo 法）和遗传算法等。梯度法在进行每一步搜索时均沿着使目标函数改善最快的方向前进。当目标函数只存在一个极值时，无论初始值如何都可以找到最优解，因此梯度法可作为单极点局部优化的一种有效算法。拉格朗日法利用拉格朗日乘子法将约束条件转移到目标函数中，将问题转化为无约束最优化问题。但在实际运用中，问题的最终结果与迭代过程的初始值和迭代步长等都有密切关系，它们影响到迭代过程能否收敛、收敛速度以及数值是否稳定

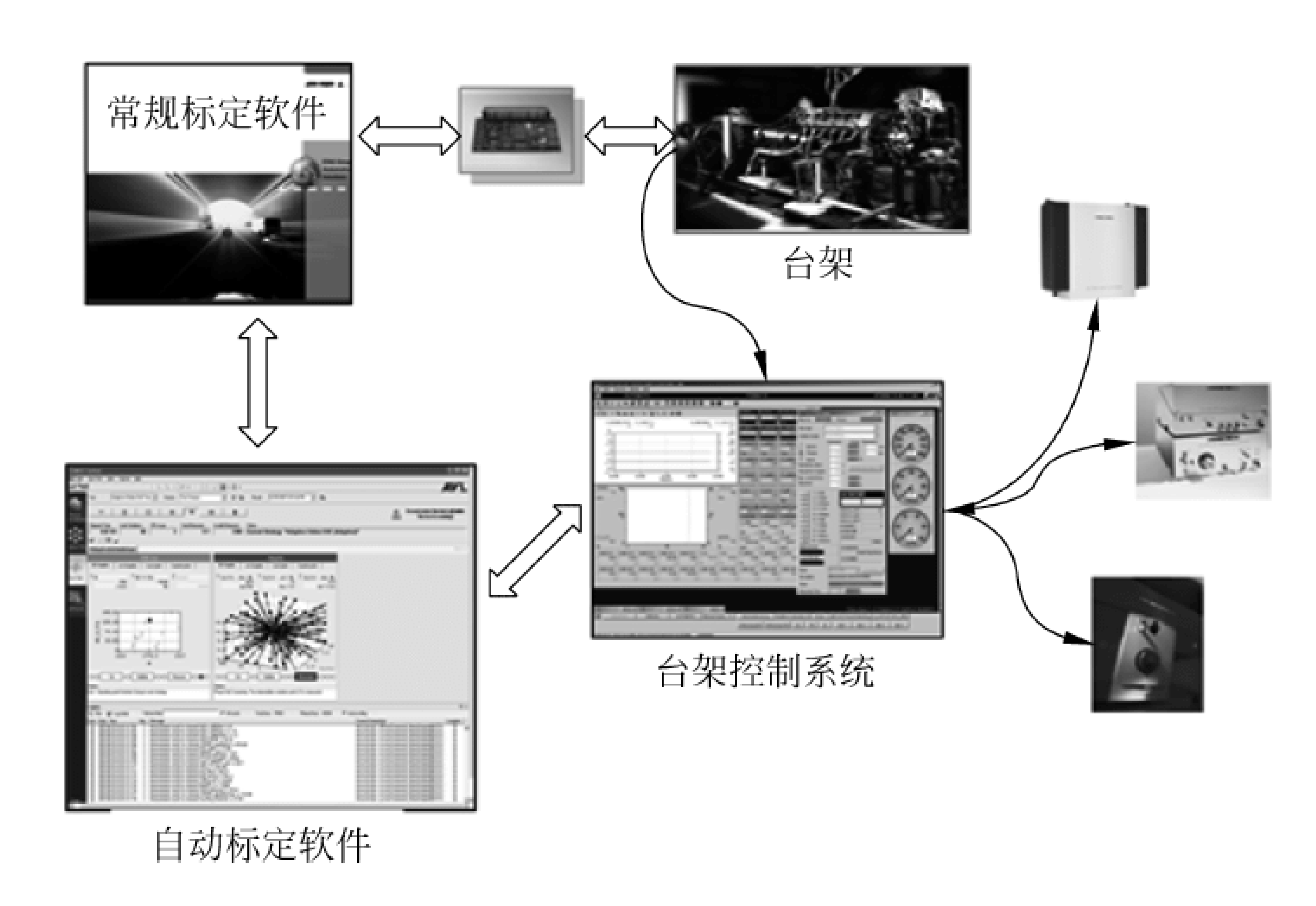


图 7-27　自动标定系统

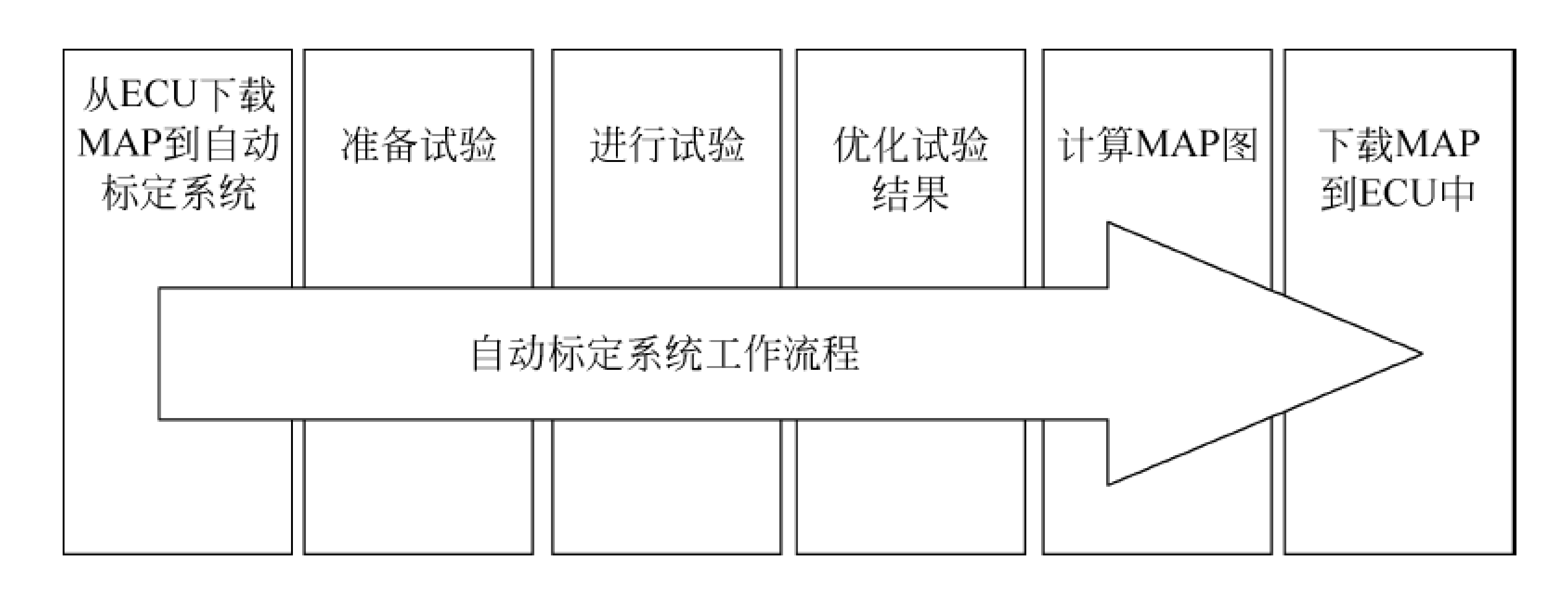


图 7-28　自动标定系统工作流程

等。因此,在实际运用中,需要工程师有比较好的经验积累和对问题的深入程度。随机试验法以概率统计为主要理论基础,以随机抽样为其主要手段,它的收敛是概率意义下的收敛,因此它获得的不是绝对最优解,而是与绝对最优解非常接近的近似解。在实际运用中,如果抽样次数选取合理,就可以获得比较满意的结果。但是如果想要获得更好的解,就需要更多抽样数及更多时间来求解,这样求解效率也就大大降低。相对于以上几种算法,遗传算法(genetic algorithm)是一种相对高效的优化算法,它是一种模拟生物进化过程和基于统计随机理论的优化搜索技术。利用遗传算法对内燃机控制参数全局优化问题的求解效果非常显著,可以在很短的时间内稳定地收敛获得最优解。因此,遗传算法在自动标定系统的优化过程中得到了越来越多的运用。

随着内燃机技术的发展,自动标定系统已成为越来越重要的标定技术和手段,它在未来的内燃机开发和标定过程中也必将发挥越来越举足轻重的作用。

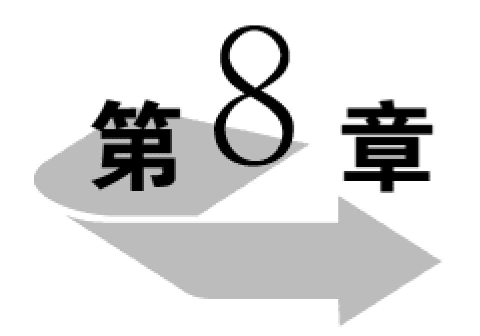
7.7 小　　结

本章仅就匹配标定的基本概念、匹配标定的基本内容和方法进行了较详细的介绍，在此基础上对典型汽车用汽油机和柴油机标定的基本方法进行了描述，同时，简要介绍了自动化标定技术。

希望本章内容能对读者有所帮助。内燃机匹配标定技术不仅涉及多门学科，同时又是工程性很强的试验技术，要想掌握好匹配标定技术，需读者在不断学习理论知识、阅读更多相关文献的同时，多进行实践，只有这样才能更好地理解和掌握匹配标定技术，进而运用到实际中去。

参考文献

[1] 王尚勇，杨青. 柴油机电子控制技术[M]. 北京：机械工业出版社，2005.
[2] 李建秋，赵六奇，韩晓东，等. 汽车电子学教程[M]. 北京：清华大学出版社，2006.
[3] 北京德尔福技术开发有限公司. 德尔福 MT20(U)内燃机管理使用及维修技术手册[G]. 2003.
[4] RASK E M，SELLNAU M C. Simulation-based engine calibration：tools，techniques，and applications[C]. SAE Technical Paper，2004-01-1264.
[5] 陈立明，朱辉，郭少平，等. 汽油内燃机管理系统稳态工况参数标定方法研究[J]. 内燃机工程，2002(1)：30-35.
[6] 姜述刚，黄海燕，朱辉，等. 电控车用汽油机的标定系统和标定试验[J]. 汽车技术，1999(1)：20-22.
[7] 黄海燕，姜述刚，张跃涛，等. 电控汽油机台架试验综合管理系统的研制[J]. 车用内燃机，1999(1)：34-37.
[8] 杨福源. 电控柴油机匹配标定技术研究[D]. 北京：清华大学，2005.
[9] 安利强. YC6112ZLQ 电控柴油机匹配标定研究[D]. 北京：清华大学，2004.
[10] 姜述刚. 电控内燃机控制参数台架自动化标定技术的研究[D]. 北京：清华大学，1999.
[11] 王舜尧. THU2006 汽油机电控系统匹配标定应用研究[D]. 北京：清华大学，2006.
[12] 韩韶辉. BN6V87QE 电控汽油机匹配标定的试验研究[D]. 北京：清华大学，2002.
[13] 吴建营. 共轨柴油机基于模型标定研究[D]. 北京：清华大学，2005.
[14] 李进. 电控柴油机综合控制系统研究[D]. 北京：清华大学，2005.
[15] 李忠剑. 内燃机动态试验台在汽车动力系统性能研究中的应用[D]. 北京：清华大学，2002.
[16] 王建昕，帅石金. 汽车内燃机原理[M]. 北京：清华大学出版社，2011.



内燃机动态模拟试验

8.1 概　　述

内燃机的动态试验在实际应用中通常用于车用内燃机，因为负载和速度持续不断地变化恰恰是车用内燃机运行环境的特征。在本章中，将对动态试验的作用、原理及方法进行描述。

内燃机动态模拟试验包含两个含义，一个是“动态过程”；另一个是“车辆模拟”。

“动态过程”是相对于“稳态过程”而言的，即运行工况是时间的函数。据统计，车辆在道路行驶期间，内燃机动态过程占了50%以上，汽车在起步、换挡、制动、加减速以及路面状况发生变化(如坡度、路面阻力)的过程中，内燃机都处于动态工况。因此，动态工况成为汽车内燃机的主要工况。

汽车在行驶过程中，根据驾驶员的意图，通过加速踏板、制动踏板以及换挡的协同动作，使内燃机相应地增减喷油量来满足负荷变化的需要。由于过渡过程中进排气、热传导、油气混合等的惯性，使得各种参数(如温度、压力、提前角等)都来不及跟随动态工况的变化，所以偏离了稳定工况原有的理想值，这会使循环进排气量、内燃机汽缸内燃烧时的放热规律发生变化，出现喷油过多或过少的现象，所有这些都会导致油耗瞬间大幅上升，同时燃烧状况的不稳定性也使得内燃机排气中的有害排放物的浓度急剧恶化，所以动态工况的性能指标和稳态时的指标是不相同的，不能用稳态的指标来进行折算。因此对动态过程要进行专门的试验研究才能准确了解其动力性、经济性和排放指标的具体情况。此外通过对内燃机动态过程的试验研究可以更加深入地了解和分析内燃机汽缸内的燃烧机理；通过对内燃机电控系统(ECU)动态过程的电控标定，精细调整喷油脉宽和喷油时刻，可以达到降低油耗、改善排放和提高车辆驾驶性能的目的。

“车辆模拟”是在内燃机试验台架上通过建立数学模型的方式对内燃机以外的车辆动力传动系统直至车轮进行仿真，也就是说在试验中除了内燃机是真实存在的，其他动力传动系

统都是虚拟的。这种车辆模拟试验台相对于汽车转鼓试验台和真实汽车的道路试验而言有其特殊的功能和优势。

(1) 当内燃机配套的汽车还处于设计图纸阶段时就可以通过模拟的方式来预测车辆制造完成后在道路上行驶的状况,使汽车动力系统的匹配提前进行,提高了研发速度,这对于一个汽车制造厂来说十分重要。

(2) 通过简便的程序编辑方式就可以修改车辆参数,如只需要在编辑的程序中更换变速箱速比,就可以对动力系统进行多方案匹配性试验,找出最佳的匹配方案,从而免除制造多种变速箱的成本和时间,提高了研发的效率。

(3) 由于去掉了道路试验中人为驾驶车辆时的动作偏差,使得试验精度大大提高。特别是进行对比试验时,如更换内燃机动力系统某一部件的试验,可以不受其他因素的影响,进而可以正确分析更换部件后对车辆性能影响的效果。

(4) 对于一些道路上难以实现的试验,如车辆的最大爬坡度、最高车速、紧急制动等高危险性试验,可以先在动态模拟实验室的台架上进行多次模拟试验,先行解决实际中可能出现的问题,减少了试验成本和试验风险。

(5) 模拟一个标准的驾驶循环,如在第 6 章中提到的中国轻型车 15 工况循环,通过该测试循环试验,可测定各种污染物在尾气中的总排放量,并和法规的要求进行对比分析。

综上所述,动态模拟试验是研究内燃机动态过渡过程和模拟实际车辆在道路行驶时内燃机所处的非稳态运行工况的重要工具。它既可以用于台架上的内燃机试验,也可以进行模拟车辆的道路试验,即再现内燃机装车后的实际运行工况,可部分替代道路试验和底盘测功机试验来研究内燃机动态性能。它克服了传统的台架稳态试验不能反映内燃机实际性能的缺点,使得研究工作者可用高精尖的测量技术来对汽车用内燃机进行开发试验研究工作。同时它降低了试验费用,提高了试验水平,缩短了研制和开发周期。

虽然内燃机动态模拟试验具有这些独特优势,但是它实现的前提是车辆的数学模型能基本反映实际的情况。我们知道,汽车真实的物理现象和对各种性能的影响是非常复杂的,再加上计算机运算速度、传感器测量精度的限制,要想完全再现实际的情况是困难的,正如一个人的照片即便图像再清晰也不可能超越站在你面前实际存在的人一样。正是这个原因,动态模拟试验后仍然要通过车辆的真实运行或汽车转鼓试验来进行检验。但这些并不能否定动态模拟试验的重要作用。只要能够抓住影响汽车性能的关键因素,建立能够反映汽车运行基本规律的物理、数学模型,上述优势就会得到充分体现,而且随着现代内燃机研究的深入,电控技术的不断进步,动态模拟技术的作用会越加突出地表现出来。

值得指出的是,在第 4 章中介绍的内燃机试验是内燃机在稳定运转工况下进行的,与本章涉及的内容的侧重点是不同的。

8.2　动态模拟试验的主要内容

内燃机动态试验的内容很多，主要有以下几个方面。

（1）模拟整车道路试验。在内燃机动态试验台上模拟法规中的满载和空载滑行试验、直接挡加速试验、换挡加速试验、最高车速试验、等速燃油消耗量试验、多工况燃料消耗量试验等，来研究汽车内燃机的动力性和经济性。

（2）内燃机动态匹配试验。对内燃机的燃油经济性和排放性能进行动态过程优化，使底盘测功机试验和道路试验的部分匹配标定工作在内燃机动态试验台上进行，从而可大大缩短汽车用内燃机的开发周期并减轻工作强度。

（3）汽车动力传动系统的匹配优化。通过对内燃机动态试验台上车辆模型和道路阻力模型中参数的改变（如整车总质量、变速器挡位数和各挡传动比、主减速器传动比、离合器特性、空气阻力系数、路面坡度等），并结合理论分析及模拟计算，研究整车各部件参数对汽车动力系统的动力性、燃油经济性和排放特性的影响规律，为汽车动力传动系统的匹配优化提供参考依据。

（4）研究使用条件对汽车动力系统性能的影响。汽车实际运行在人、车、路组成的系统中，通过改变动态试验台上的驾驶员模型和道路交通条件模型（驾驶循环）的参数，研究人和路的因素对汽车动力系统燃油消耗和排放等性能的影响规律。

（5）模拟整车驾驶循环试验。在内燃机动态试验台上模拟国内外排放法规中规定的各种标准测试循环，如欧洲的 ECE＋EUDC，美国的 FTP-75、美国加州的 LA92，日本的 10.15 循环工况等，或者根据专题研究的需要制定自定义循环工况进行试验，研究不同循环工况下汽车内燃机排放性能。

8.3　动态试验台的结构和原理

内燃机动态试验台不同于常规的内燃机试验台，动态试验台具有较高的动态响应和较小的非线性失真，可模拟汽车行驶时内燃机所处的动态工况并对各种主要参数进行测量。

内燃机动态试验台系统包括硬件设备和系统管理软件两大部分。硬件设备包括交流（或直流）电力测功机、油门执行器、动态油耗仪、排放分析仪、空气流量计，各种传感器以及计算机系统。动态试验台系统管理软件包括控制和计算用的数学模型以及控制程序，参数设置及系统文件编辑，用户界面及实时显示，数据库的管理、分析与处理。

内燃机动态模拟试验台原理如图 8-1 所示。从图中可看出它是通过对内燃机和测功机的转速和扭矩的精确控制，使内燃机输出轴上承受的负载与道路试验和底盘测功机试验时的负载具有相同的特性。而内燃机在台架上工作状态的时间历程与内燃机在整车道路试验或底盘测功机上试验的时间历程也是相同的。在底盘测功机上试验时，通过转鼓与车轮接

触点的摩擦阻力来模拟汽车在道路上的行驶阻力，驾驶员按给定的目标车速行驶。在内燃机动态试验台上则通过以下模型对内燃机以外的部分进行行驶模拟：汽车行驶阻力模型；车辆的离合器、变速器模型；平动和旋转惯性质量模拟；内燃机与传动系统之间的扭转振动模型；驾驶员的起步、换挡，驾驶员的跟踪车速、制动和换挡决策模型。根据设定的目标车速，通过这些模型转换成内燃机目标转速和扭矩，作为调整内燃机的节气门开度、测功机的转速和加载扭矩的依据，从而模拟出汽车实际的道路行驶状况。

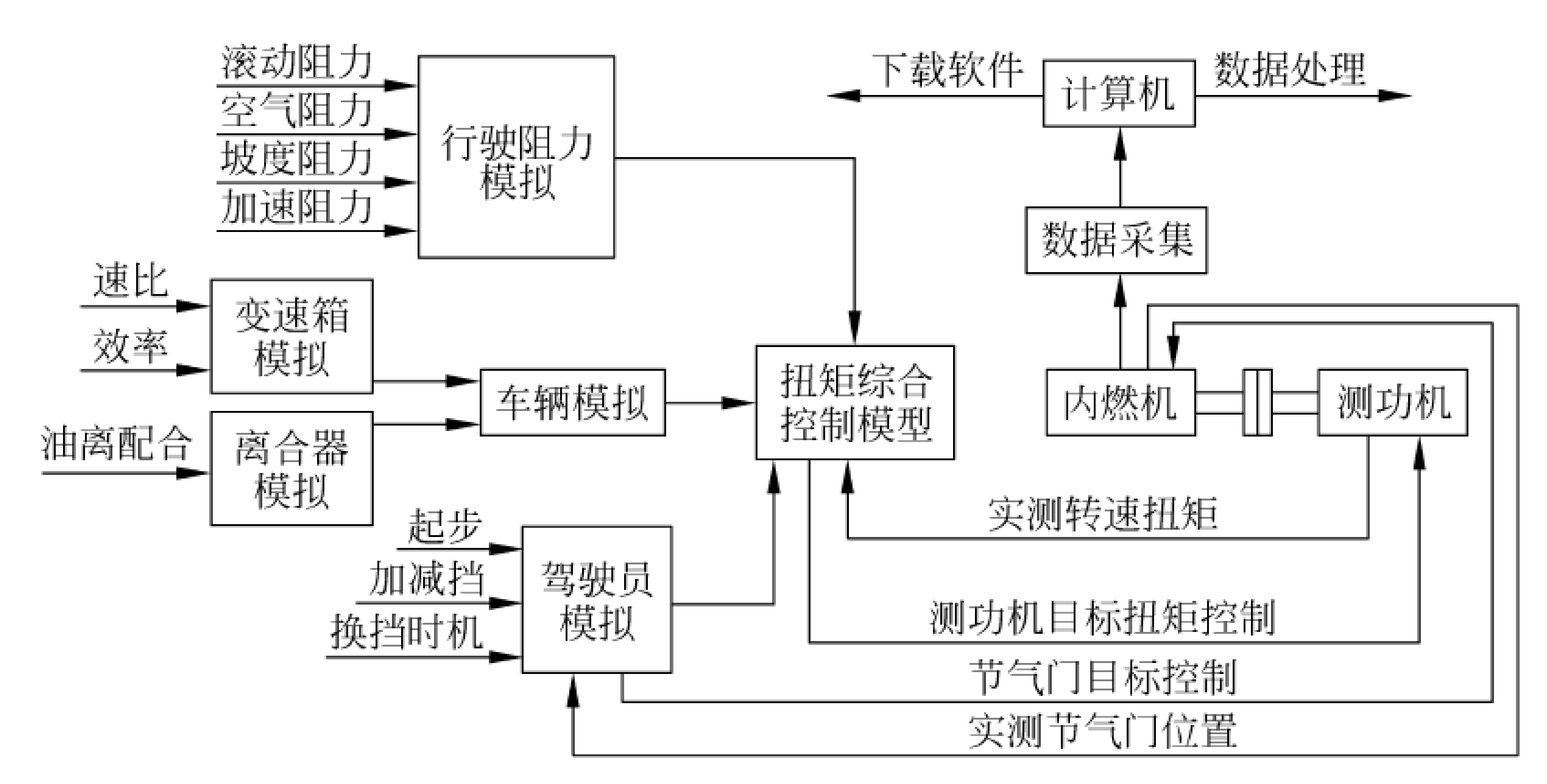


图 8-1 内燃机动态模拟试验台的原理图

根据其基本原理可看出：动态试验台的一个很重要的功能就是可替代转鼓试验台的部分试验内容。这样不仅能提高内燃机开发速度，还可降低试验成本，缩短试验周期。

8.4 内燃机动态模拟试验

为了有效地进行内燃机动态模拟试验，需要对汽车行驶阻力、车辆传动系统各部件、车辆和驾驶员等进行模拟。

对汽车行驶阻力和车辆传动系统各部分的模拟是内燃机在其动态试验台上模拟整车道路试验和整车底盘测功机试验的基础。其目标是使内燃机的工作状况与在道路上行驶过程中内燃机的工作状况或在底盘测功机上模拟的工作状况一致。

8.4.1 行驶阻力模拟

汽车在水平道路上匀速行驶时必须克服滚动阻力和空气阻力；在上坡行驶时要克服重力沿坡道方向的分力，即坡度阻力；汽车加速行驶时需要克服惯性力，即加速阻力。因此，行驶阻力主要包括汽车在道路行驶中的滚动阻力、空气阻力、坡度阻力和加速阻力。对这些阻力的模拟是根据用户输入的整车和传动系统各部分的相关参数，以及所模拟的道路状况和车速轨迹变化情况进行的。具体过程是，先按照一定的数学模型分别计算各种阻力并相

加，然后按照传动系的参数折算到内燃机的曲轴上，并由此控制测功机所施加的载荷和由车速换算的测功机转速。

1. 滚动阻力

汽车在路面上行驶时的滚动阻力计算公式为

$$F_f = A_0 + B_0 v + C_0 v^n$$

式中：F_f——滚动阻力，N；

v——汽车行驶速度，m/s；

A_0——滚动阻力中不随车速变化的部分，N；

B_0——滚动阻力中速度 1 次项的比例系数，N/(m/s)；

C_0——滚动阻力中速度 n 次项的比例系数，$N/(m/s)^n$；

n——拟合指数。

测定汽车滚动阻力的试验方法有如下 3 种。

(1) 滑行试验。汽车以一定速度在道路上行驶，然后挂空挡滑行，车速在滚动阻力作用下逐渐减小，测出减至某一速度的时间和距离，计算出减速度。然后计算出总阻力，从中减去估算的空气阻力，从而得到不同车速下的滚动阻力。

(2) 使用拉力计进行牵引试验。读取安装在汽车上的牵引拉力计的数值确定滚动阻力。

(3) 使用可测出轮式车辆驱动车轮实际驱动扭矩的装置进行测试。

2. 空气阻力

汽车直线行驶的空气阻力为

$$F_w = \frac{1}{2} C_D A \rho v^2$$

式中：F_w——空气阻力，N；

C_D——空气阻力系数；

A——迎风面积，m^2；

ρ——空气密度，kg/m^3。

空气阻力系数 C_D 可通过风洞试验或者滑行试验得到，通过风洞试验得到的 C_D 较为精确。

3. 坡度阻力

汽车上坡行驶时坡度阻力 F_i 可按下式计算：

$$F_i = mg\sin\alpha$$

式中：m——汽车质量，kg；

g——重力加速度，N/kg；

α——路面坡度角(可以用角度也可以用弧度)。

把滚动阻力、空气阻力和坡度阻力之和根据传动比折算到内燃机曲轴上。设变速器某

一挡位的传动比为 i_g，主减速器传动比为 i_0，车轮的滚动半径为 r，传动系统的总效率为 η_T，则折算到内燃机曲轴处的阻力矩 M_e 为

$$M_e = \frac{(F_f + F_w + F_i)r}{i_g i_0 \eta_T}$$

4. 加速阻力

汽车加速行驶时，需要克服其加速运动的惯性力，即加速阻力（F_j）。汽车质量分为平动的质量和旋转运动的质量，加速时不仅平动的质量产生惯性力，旋转运动的质量也要产生惯性力矩，而且汽车上作旋转运动的各个部件以不同的角速度旋转，角加速度也不相同。

在动态试验台上内燃机是真实的，内燃机的转动惯量对汽车速度变化过程的影响也就是真实的。车辆的其他部分在动态试验台上并不存在，而是通过数学模型来模拟它们的转动惯量以及转动惯量对汽车速度变化过程的影响。动态试验台是通过对测功机的载荷控制来把车辆其他部分的平动惯性质量和转动惯性质量对汽车加速过程的影响施加到内燃机上。有关加速阻力的计算公式可参考汽车原理书籍。

8.4.2 车辆模拟

车辆传动系统主要包括离合器、变速器、传动轴、主减速器、车轮等，车辆模拟主要是变速器的模拟和离合器的模拟。

1. 变速器的模拟

动态试验台的手动变速器模型中的基本参数是各个挡位的传动比和传动效率。通过模拟换挡时内燃机转速和扭矩的波动这一复杂的现象，再现实际变速器的换挡过程，内燃机动态试验台上也可以实现对自动变速器的模拟。

2. 离合器的模拟

由于在内燃机动态试验台上没有真实的离合器，所以需要离合器的模型来模拟离合器的机械特性。离合器的模型包括两个参数，一个是离合器完全结合时所能传递的最大扭矩，另一个是离合器的扭矩传递特性曲线。离合器接合过程的模拟也是一种很复杂的现象。

8.4.3 驾驶员模拟

完成了对行驶阻力和车辆的模拟后，还需要对驾驶员进行模拟。装有手动变速器的汽车在道路试验或者底盘测功机上试验时，由驾驶员操纵加速踏板、离合器、制动踏板和变速器来达到试验规范对车速轨迹的要求。驾驶员的不同操作，会影响内燃机的工作状况和功率输出状况，从而对汽车的动力性、燃油经济性和排放特性产生影响。因此在动态试验台上

要建立驾驶员模型来模拟驾驶员的纵向操纵特性，即模拟驾驶员对汽车直线行驶方向直接影响的各种动作，包括离合器的接合与分离，操纵加速踏板和制动踏板，挡位的选择和换挡过程等。建立这一模型的目的除了统一试验时的驾驶动作规范外，还能通过调整驾驶员模型中的各个参数来模拟不同驾驶水平和驾驶习惯的驾驶员，进而研究驾驶员的纵向操纵特性对汽车动力系统性能的影响。

驾驶员模型主要就是模拟以下几种纵向操纵模式：①起步；②升挡；③降挡；④固定挡位下的车速轨迹跟踪；⑤挡位和换挡时机的决策（换挡规律）；⑥预测驾驶模拟。

具体地说，在起步和换挡过程中依据离合器、加速踏板、换挡动作不同的配合关系反映出不同的驾驶员特性。例如节气门开启的时刻与离合器位置关系；节气门开度随时间变化曲线；离合器分离时刻，离合器分离过程曲线；换挡开始时刻，换挡过程时间；离合器开始接合时刻，接合过程曲线。可采用试验的方法，以实际驾驶员的起步、换挡操作过程为基础，通过对大量数据的统计分析，建立几种反映不同驾驶水平和驾驶习惯的起步和换挡操作模型。

总之，建立了汽车行驶阻力模型、车辆模型和驾驶员的纵向操作习惯模型之后，就可以使一辆虚拟的汽车在内燃机动态试验台上飞驰了。

8.4.4　动态模拟试验方法及应用实例

通过汽车内燃机动态试验台上的计算机进行模拟参数的编辑，准备好被测试的内燃机，使其处于正常状态。完成所有准备工作之后起动内燃机，进行模拟驾驶试验。试验时动态试验系统的仿真软件模块会自动计算出在运行工况下汽车要求内燃机提供的扭矩和转速设定值，通过传感器实时反馈的信息不断修正控制参数，在内燃机所能提供的实际能力的条件下进行性能的测试与评价。

下面列举几种动态模拟试验的应用实例。

1. 不同换挡规律对汽车性能影响的试验

图 8-2 为模拟整车换挡加速试验过程的例子，在操作模式相同的情况下，研究在两种不同的换挡时机，车速随时间的变化规律。从图中可看出，使用动力性换挡规律优先考虑加速的快慢时，0～100 km/h 的加速时间为 30 s，0～120 km/h 的加速时间为 44 s；使用经济性换挡规律优先考虑经济性时，0～100 km/h 的加速时间为 35 s，0～120 km/h 的加速时间为 53 s。动力性换挡规律加速到 120 km/h 只换到了 4 挡，经济性换挡规律在开始加速后的第 30 s 之后就换上了 5 挡。试验中测得的油耗经换算得出的结果是：使用经济性换挡规律运行的百公里油耗为 11.7 L，使用动力性换挡规律运行的百公里油耗为 13.1 L。从中可看出，动力性换挡规律运行的百公里油耗比经济性换挡规律的大 12%。

2. 驾驶循环试验

图 8-3 表示的是某内燃机在动态试验台上运行 ECE＋EUDC 工况循环（表示欧洲工况，

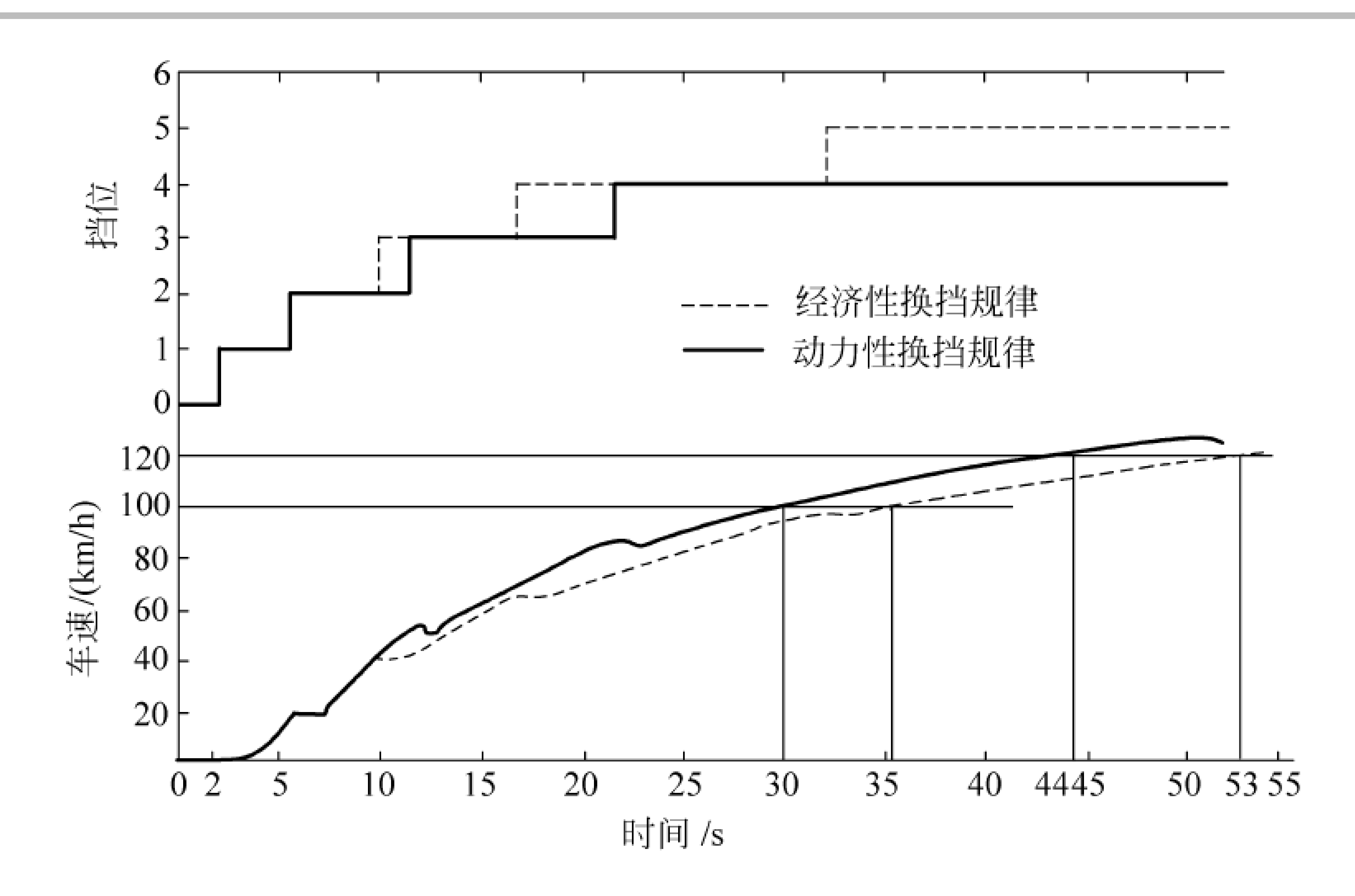


图 8-2 汽车的换挡加速过程曲线

城区＋郊区混合道路)的排放测试结果。从图中可分析油耗、CO、HC、NO_x 值随车速的变化情况,从而找出降低油耗和排放污染物措施。

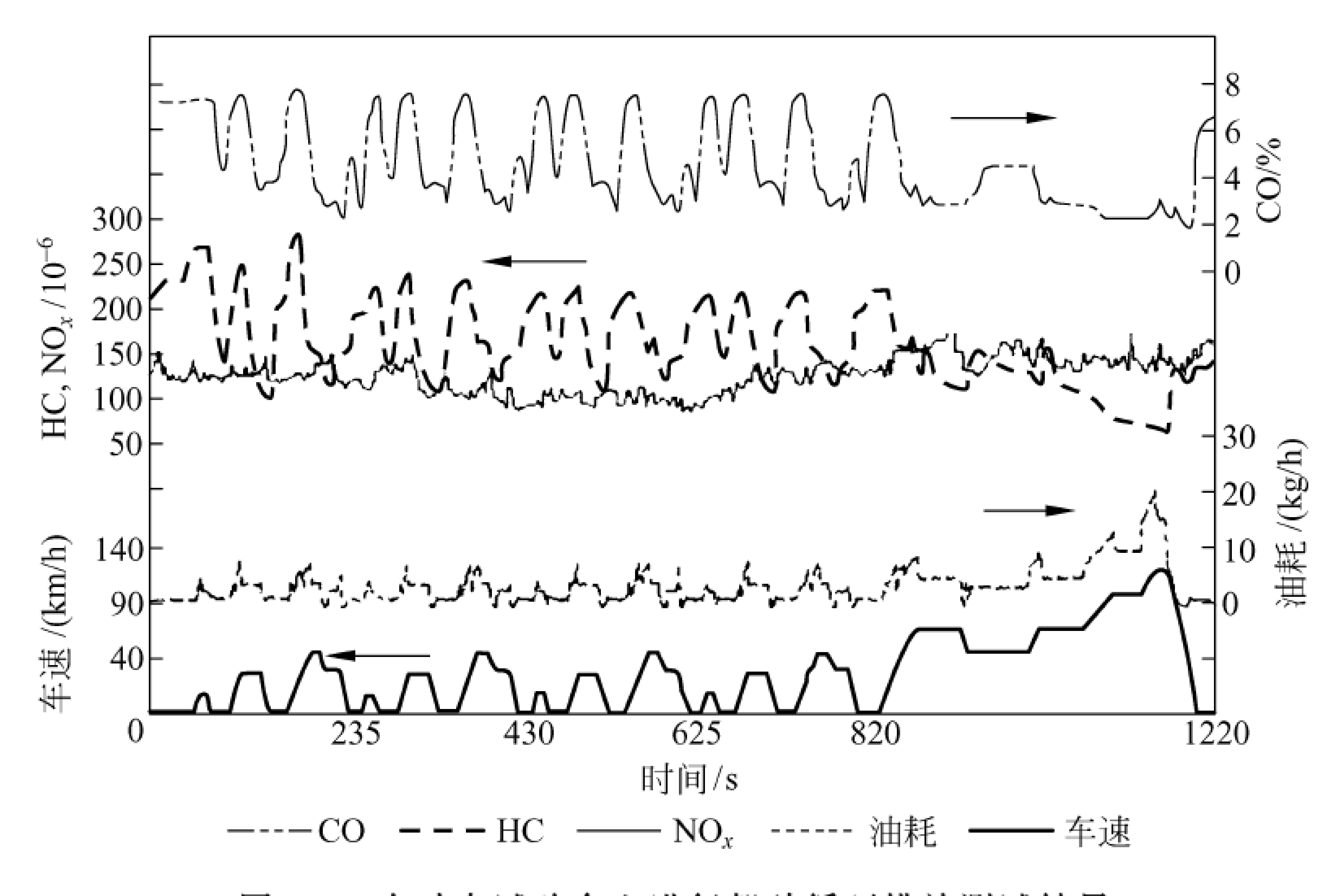


图 8-3 在动态试验台上进行驾驶循环排放测试结果

3. 混合动力系统模拟试验

动态模拟试验在新能源汽车的研发中发挥着重要作用,例如对某 15 t 燃料电池城市客车进行典型加减速循环工况试验。从图 8-4 所示曲线可以看出车辆运行过程中能量的变化过程。该动态试验系统自动控制的试验工况见表 8-1。通过台架连续 150 h 循环工况的试

验,检验燃料电池混合动力系统在大电流冲击时的性能和可靠性;检验蓄电池的充放电性能及在车辆上的适应能力;检验电机及控制器在车辆突然加、减载情况下的动力响应与可靠性;建立优化的整车控制策略使车辆的共性问题在制造完成前得到解决。因此,动态模拟试验台能够方便有效地模拟出实际中影响汽车各性能的主要因素,在汽车动力系统开发的早期,就能针对目标汽车特定的行驶工况,对汽车动力系统的性能提出要求,并进行客观合理的评价,这增加了动力系统的可行性和合理性,大大缩短了整个研发周期。

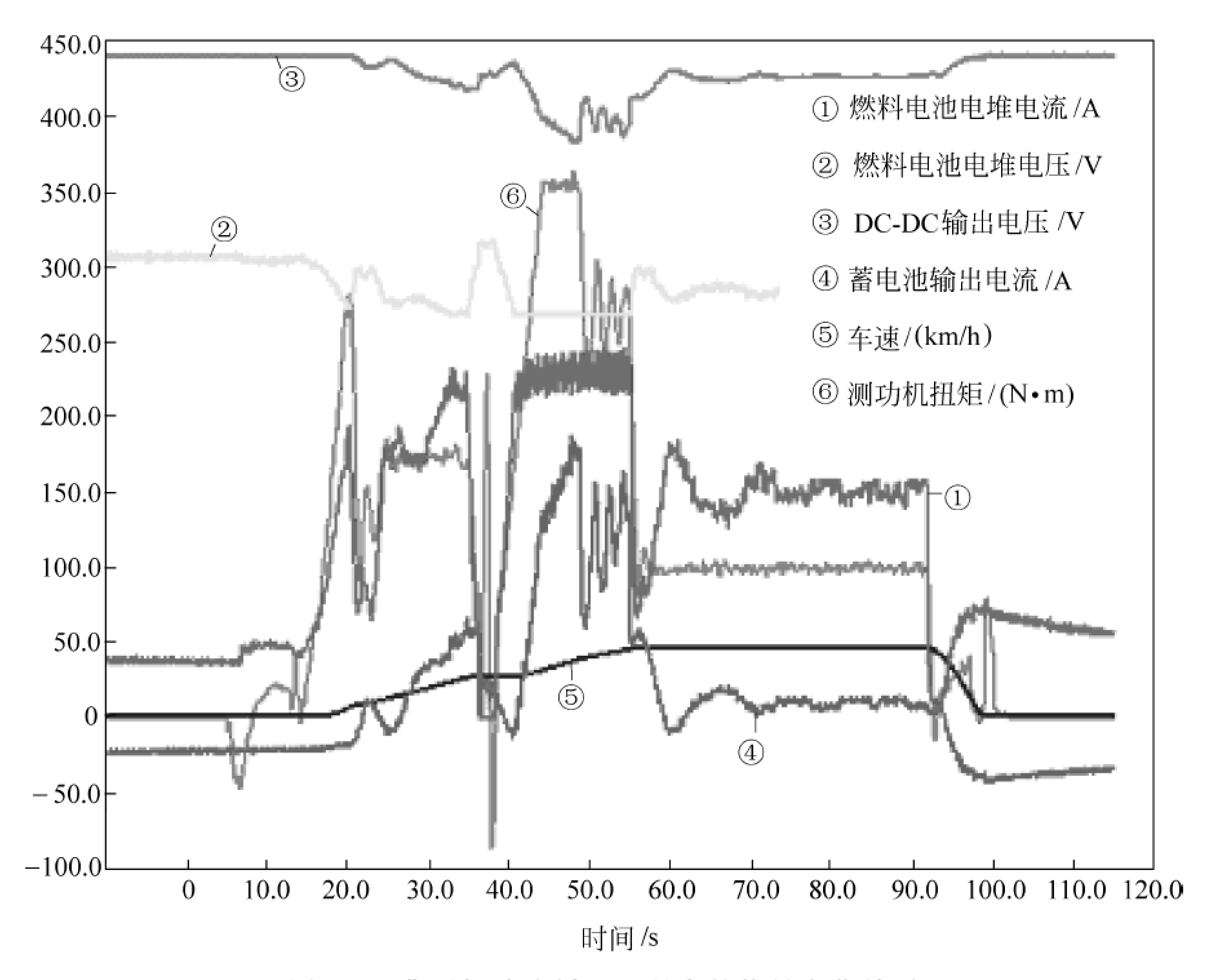


图 8-4　典型加减速循环工况中的能量变化关系

表 8-1　动态试验系统自动控制试验工况

步　骤	动 作 过 程
1	燃料电池系统起动怠速
2	挂 1 挡
3	加速至 26 km/h,加速时间为 20.28 s
4	换 2 挡,由 1 挡换 2 挡的时间为 1 s
5	2 挡加速至 46 km/h,加速时间为 19.20 s,最大加速度 1.08 m/s^2
6	保持 2 挡状态,车速稳定在 46 km/h 下运行时间为 36.4 s
7	制动,车速降为 0,制动时间为 4.8 s,制动最大减速度−4 m/s^2
8	挂空挡,使燃料电池系统处于怠速状态,怠速时间为 42.32 s

关于燃料电池系统更详细的内容见第 9 章。

参考文献

[1] 谢勇，张俊智，卢青春，等. 基于发动机动态试验台的驾驶员纵向操纵特性对汽车动力系统性能影响的研究[J]. 机械工程学报，2004(9)：111-115.

[2] 张俊智，卢青春，黄海燕. 发动机动态试验台的混合模拟研究[J]. 清华大学学报(自然科学版)，1999(8)：23-25.

[3] 童毅. 并联式混合动力系统动态协调控制问题研究[D]. 北京：清华大学，2004.

[4] 刘毅，张稀林，贾桢，等. 发动机动态模拟系统的试验研究[J]. 车用发动机，2003(5)：19-21.

[5] MIGUEL M A，GALDINO A，PAULINO H L，et al. Determination of dynamic characteristics engine torque delivered to the transmission through different types of clutches[C]. SAE Technical paper，2000-01-3152.

[6] KAZUNARI N，KATSUTOSHI O. Dynamic characteristics of cylindrical hydraulic engine mounts with simple construction utilizing air compressibility[C]. SAE Technical paper，2000-01-0036.

第9章 燃料电池系统的开发试验

20世纪90年代以来，能源危机和环境污染两大问题日益受到重视。众所周知，汽车既是石油的主要消耗者，又是大气污染的主要来源。为减少对石油的依赖，降低排放，人们一直在研究代用燃料内燃机以及新能源动力系统以解决能源危机。氢作为一种可再生、清洁无污染的能源，无疑有希望在不久的将来成为传统能源的理想替代品。随着燃料电池技术的进步和成本的不断降低，以氢作为能源的燃料电池动力系统受到了世界著名汽车制造商的极大关注。

车用燃料电池动力系统发展初期，其试验测试方法的基本思路是参考车用燃油内燃机性能的测试方法。这是因为无论何种汽车动力，作为汽车用动力，在性能要求上有很多共性之处，由于燃油内燃机在工作原理上与车用燃料电池系统有着本质的区别，即燃油内燃机是通过燃料的燃烧和热力循环将化学能转化成机械能，而燃料电池系统则是通过氢气和氧气的电化学反应将化学能转换为电能，再由电动机将电能转化为机械能，因此，其测试技术及方法会有很大不同。

燃料电池(动力系统一般)由燃料电池系统、电池和电动机组成，由于影响燃料电池动力系统性能的主要因素是燃料电池系统，因此本章着重介绍作者所在单位在进行汽车用质子交换膜(proton exchange membrane，PEM)燃料电池堆及系统的性能测试时应用的一些基本试验方法，供读者从事新技术、新科技产品试验时参考。同时作者所在单位负责起草的车用燃料电池系统测试标准已在2011年底发布。

9.1 燃料电池系统的工作原理

9.1.1 燃料电池

燃料电池是将化学能转换为电能的装置，其基本原理如图9-1所示。从图中可看出，在电池内部的膜电极三合一组件(MEA)上，氢气经过电极的扩散层与催化层到达膜与催化剂界面发生活化，成为氢离子(质子)，并向电极释放电子，其反应式为

$$H_2 \longrightarrow 2H^+ + 2e^- \tag{9-1}$$

氢离子经过质子交换膜到达电池阴极，在阴极催化剂的作用下，由到达阴极扩散层空气中的氧气与氢质子以及经负载回来的电子发生反应生成水：

$$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2O \tag{9-2}$$

最简单的燃料电池是单电池燃料电池，它由三合一组件和用来输送气体和冷却水的双极板组成。由于单片电池的发电能力有限，因此一般大功率的燃料电池都把许多片的单电池组合在一起，反应气体和冷却水则由堆内的共用气体总管和冷却水总管来向各单片提供，形成燃料电池堆。燃料电池堆的结构如图 9-2 所示。

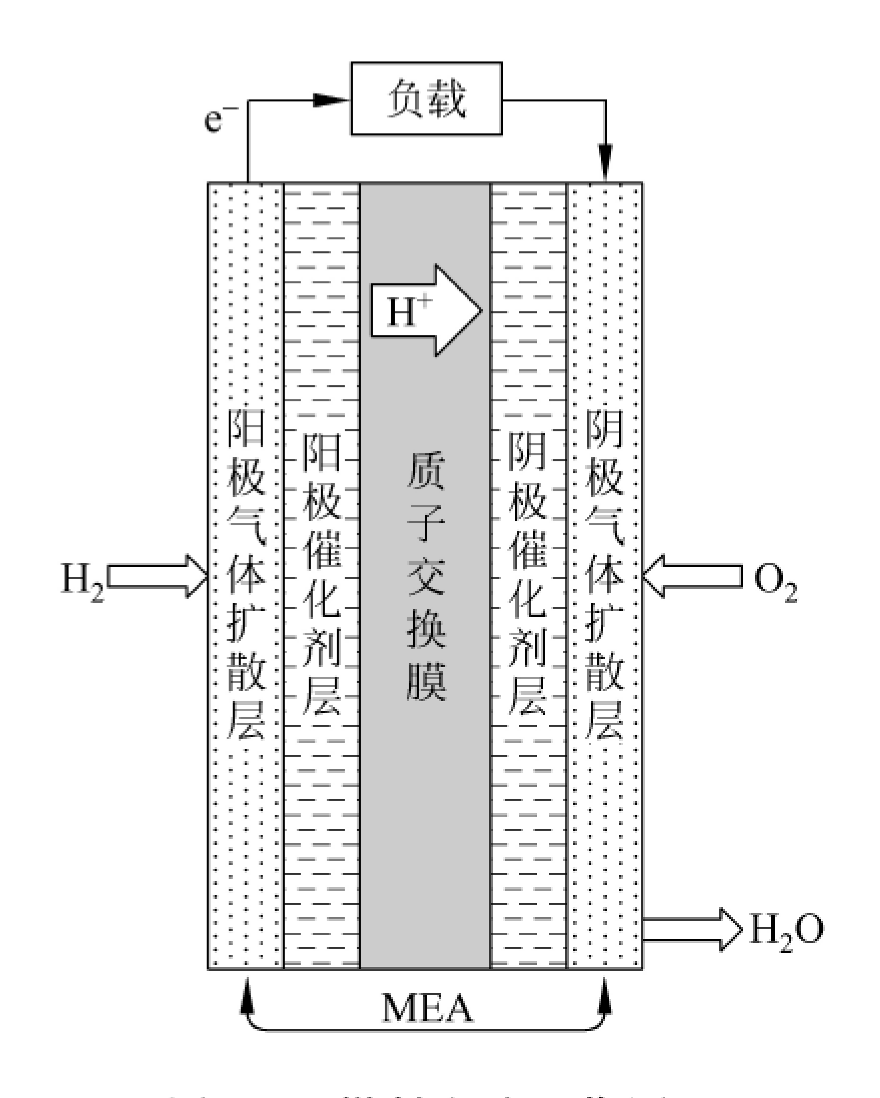


图 9-1 燃料电池工作原理

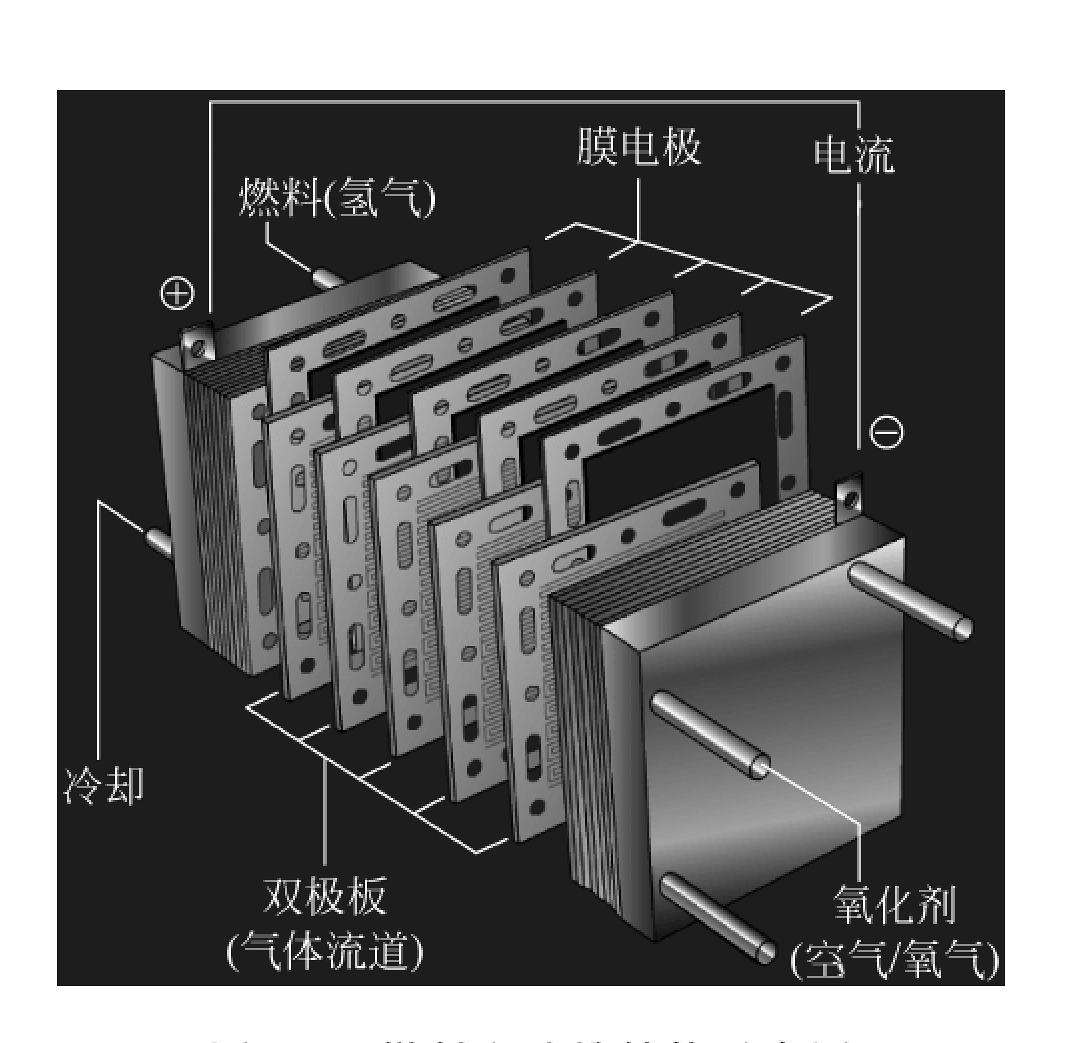


图 9-2 燃料电池堆结构示意图

关于燃料电池的更多内容见参考文献[1,2]等。

9.1.2 燃料电池系统

燃料电池系统主要由燃料电池堆、氢气系统、空气系统、水热管理系统和控制系统组成，其示意图如图 9-3 所示。

（1）燃料电池堆（简称电堆） 电堆是燃料电池系统的核心，反应气体在电堆中反应，将化学能转换为电能。

（2）氢气系统 高压氢气从储气罐中出来经过减压和稳压，稳定到一个比较合适的压力，并经过增湿后进入电堆。

（3）空气系统 为电堆提供氧化剂，按照反应气体压力的高低，燃料电池系统可以分为高压系统和低压系统。高压系统采用空气压缩机提供高压空气，低压系统（也叫常压系统）则一般采用鼓风机供气。

（4）水热管理系统 燃料电池堆对水管理的要求很高，要求保证膜的湿润，同时避免水

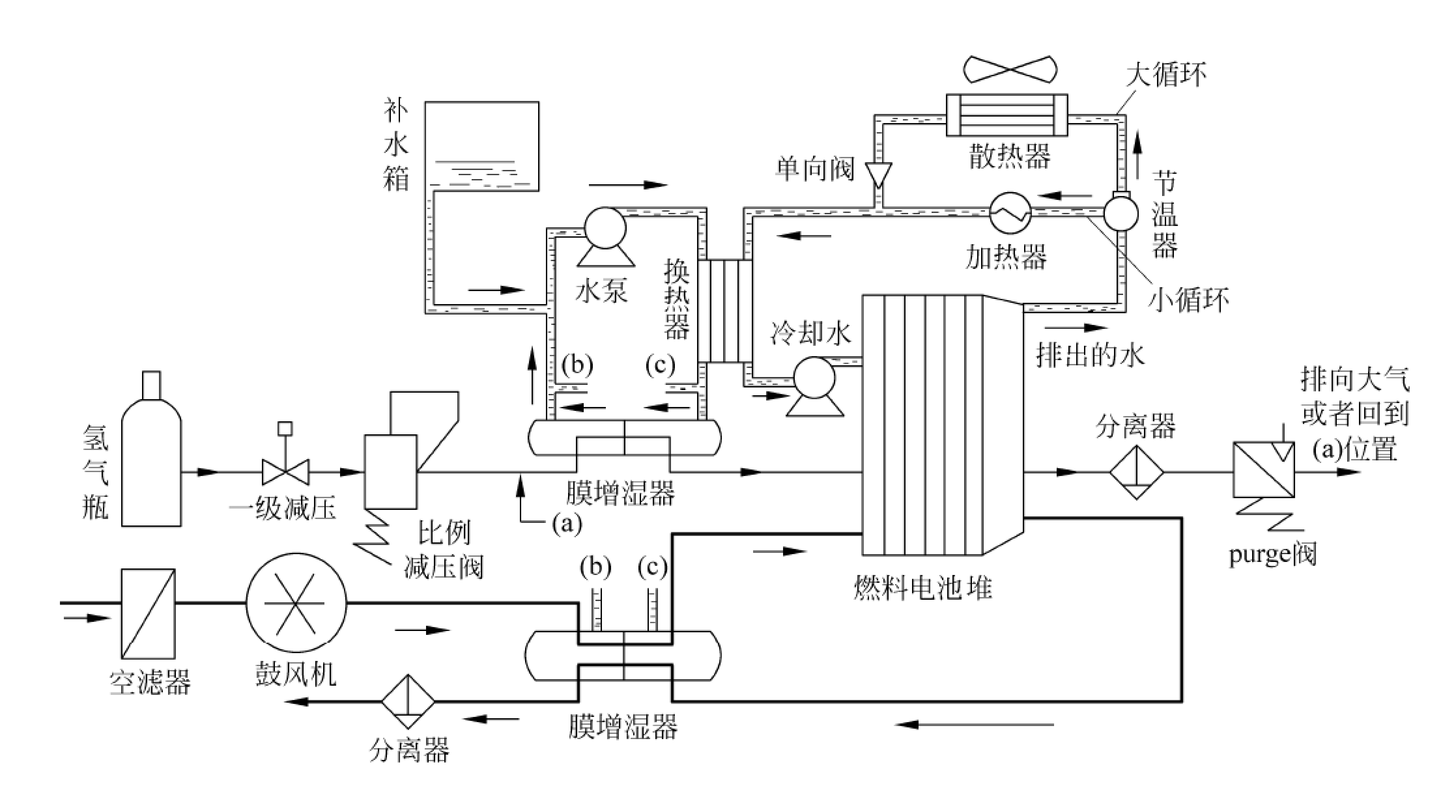


图 9-3　某燃料电池系统(低压系统)示意图

堵塞反应气通道。一般在反应气体进入电堆之前进行增湿,常用的增湿方法有冒泡法、膜增湿法、喷射法、蒸汽增湿法、循环法、焓轮增湿法等。排水一般采用脉冲排气法,阳极侧一般设有排气(purge)阀;燃料电池堆的热管理与传统内燃机一样,为了排出燃料电池堆工作中的废热,维持燃料电池堆在一定的温度范围内工作,需要对燃料电池堆进行冷却。

(5) 控制系统　通过检测传感器信号和需求信号,利用一定的控制策略来控制执行器,保证系统正常运行。

随着科学技术的进步,燃料电池系统也在不断优化,有的企业设计的燃料电池系统已取消膜增湿器,而是采取更加简化的结构来保证膜的湿润,有关燃料电池系统新技术读者可参考相关文献。

9.2　主要性能参数及技术指标

燃料电池性能曲线及参数主要有以下几个。

1. 伏安曲线

目前国内外研究分析燃料电池堆的性能主要是通过研究电堆的电流-电压极化曲线(伏安曲线)来进行。典型的电流-电压极化曲线如图 9-4 所示。通过电堆的极化曲线,可以研究和分析电堆的性能及变化规律,而其输出功率是极化曲线上工作电压与输出电流的乘积。

2. 电流密度

电流 I 除以反应界面的(有效)面积 S,称为电流密度,单位是 mA/cm^2。对任一燃料电

池来说，在相同工作电压的情况下，都要求提高输出电流来提高其工作性能。由于工作电流与电池的电极有效面积成正比，所以人们通常用电堆单片平均工作电压与输出电流密度的关系来衡量电池性能，这也便于对不同规格或型号的电池性能进行比较。

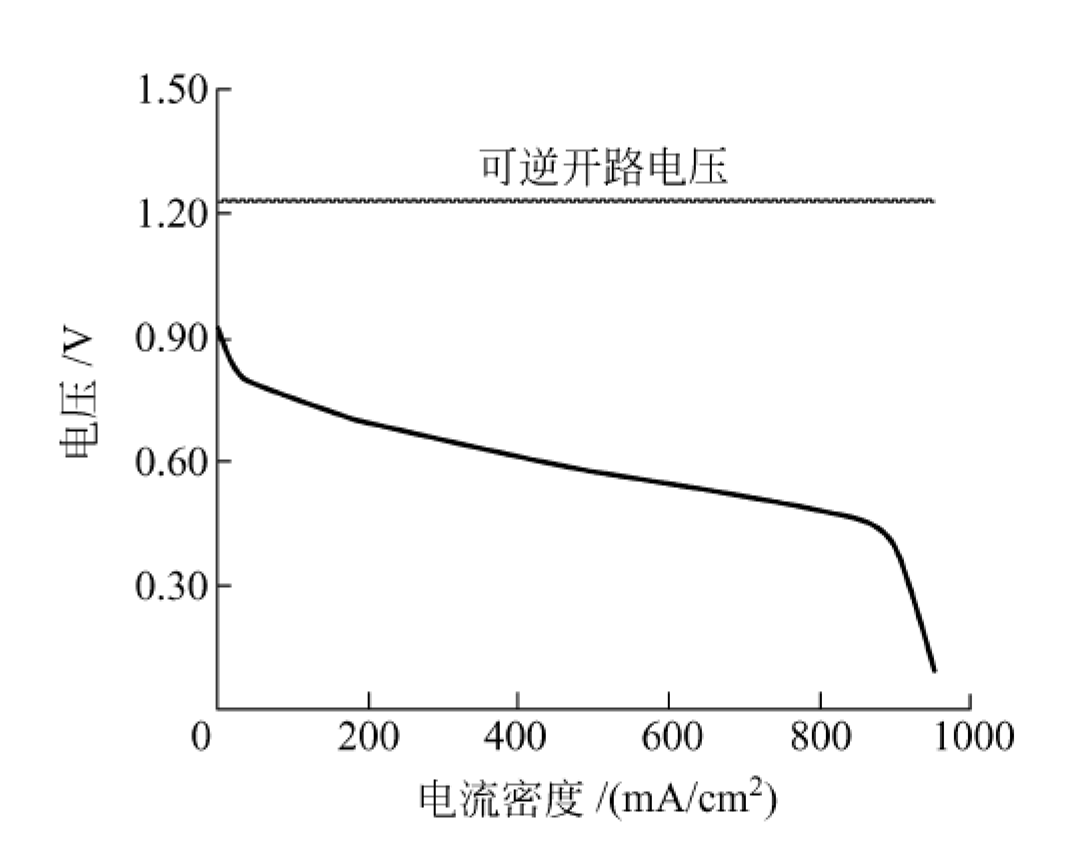


图 9-4　典型质子交换膜燃料电池工作特性

3. 功率密度

燃料电池堆功率密度是指燃料电池堆能输出的最大功率除以其质量或体积；燃料电池系统功率密度是指燃料电池系统能输出的最大功率除以整个燃料电池系统的质量或体积，单位是 W/kg 或 W/L。它是衡量燃料电池堆和系统性能的一个重要指标。

燃料电池系统的技术指标主要有功率、效率等，这些将在下文逐一介绍。

9.2.1 燃料电池系统的输出功率

燃料电池系统的输出功率是燃料电池堆的输出功率减去附属系统所有耗电部分的总消耗功率所剩余的部分，它是燃料电池系统输出的有用功率。附属系统中的空压机(低压系统则用鼓风机)是最大的功率消耗部件，它占据了附属系统消耗功率的绝大部分。所以，可以近似认为电堆输出功率减去空压机消耗的功率就是燃料电池系统输出功率。

燃料电池堆的输出功率是指其工作电压与输出电流的乘积。在实际测试过程中采用的计算公式为

$$\text{电堆输出功率(kW)} = \frac{\text{电堆工作电压(V)} \times \text{电堆输出电流(A)}}{1000} \tag{9-3}$$

$$\text{燃料电池系统输出功率(kW)} = \frac{\text{燃料电池系统输出电压(V)} \times \text{燃料电池系统输出电流(A)}}{1000} \tag{9-4}$$

$$\begin{aligned}\text{燃料电池系统附属系统消耗功率(kW)} = {} & \text{电堆输出功率(kW)} - \\ & \text{燃料电池系统输出功率(kW)}\end{aligned} \tag{9-5}$$

一般情况下，燃料电池系统输出电压与电堆工作电压相等。

燃料电池动力系统输出功率则由电动机的输出扭矩与转速计算。

9.2.2 燃料电池的效率

关于燃料电池效率的定义及计算方法在文献[1,2]中有详细的介绍，针对车用燃料电池的特点，将燃料电池堆的效率定义为单位时间内所消耗燃料的能量转化为电堆输出功率的

份额；燃料电池系统的效率定义为单位时间内所消耗燃料的能量转化为燃料电池系统输出功率的份额。计算表达式为

$$电堆效率 = \frac{电堆输出功率(kW) \times 3600 \times 1000}{氢气化学能消耗量(J/h)} \times 100\% \tag{9-6}$$

$$燃料电池系统效率 = \frac{燃料电池系统输出功率(kW) \times 3600 \times 1000}{氢气化学能消耗量(J/h)} \times 100\% \tag{9-7}$$

$$氢气化学能消耗量(J/h) = 氢气消耗量(g/h) \times 氢气低热值(J/g) \tag{9-8}$$

热值有低热值和高热值之分，燃料电池堆中氢气与氧气发生化学反应时，生成气态的水分子。这些气态水不论在堆内或堆外变为液态水，其释放的潜热不在电堆输出能量之内，所以在进行效率计算时，为了方便与传统内燃机比较，热值通常取低热值，氢气低热值为 120.915×10^3 J/g。

9.2.3　氢气利用率的计算

氢气利用率是指燃料电池系统工作过程中，参与电化学反应的氢气量与总的氢气消耗量的比值。因此，计算氢气利用率首先要计算参与反应的氢气流量，该流量的计算是燃料电池发动机性能参数中计算的重点。计算的思路是依据法拉第定律计算电池堆实际输出电流所需燃料量与实际燃料消耗量之比。

由燃料电池的基本工作原理可知，参与反应的氢气量与电路中转移的电子有明确的比例关系，而电子的转移就在外电路中形成电流。因此，可以通过电堆输出的电流来计算参与反应的氢气流量。

根据燃料电池阳极的反应方程式(9-1)，设参与单电池反应的氢气流量为 x mol/s，则同时产生 $2x$ mol/s 的电子转移。将单位时间电子转移的物质的量乘以法拉第常数，就可得到电路中单位时间流过的电量，即由参与反应的氢气流量计算出电流。利用测量得到的流过单电池的实际电流 I_{stack}，就可以得到下面的方程：

$$2xF = I_{stack} \tag{9-9}$$

于是可以计算出参与反应的氢气流量

$$x = \frac{I_{stack}}{2F} \tag{9-10}$$

上式计算得到的结果为一个单电池参与反应的氢气流量，需要将其乘以单电池片数 n，再把单位转换为 g/h，就得到了参与反应的氢气流量的计算公式：

$$B_a = \frac{I_{stack}}{2F} \times n \times 2 \times 3600 = \frac{3600}{F} nI_{stack} = 0.037311 nI_{stack} \tag{9-11}$$

式(9-10)、式(9-11)中：

B_a——参与反应的氢气流量，g/h；

I_{stack}——流过单电池的电流，A；

F——法拉第常数，96485 C/mol；

n——单电池片数。

所以氢气利用率可以通过下面的公式计算

$$\eta_F = \frac{B_a}{B} \times 100\% = \frac{0.037311 n I_{stack}}{B} \times 100\% \tag{9-12}$$

式中：η_F——法拉第效率，%；

B——总的氢气消耗量，g/h。

9.2.4 氢气消耗率的计算

传统内燃机燃料消耗率的定义为每千瓦小时有效功所消耗的燃料量。计算公式为

$$g_e = \frac{B}{P_e} \times 10^3 \tag{9-13}$$

式中：g_e——燃料消耗率，g/(kW·h)；

B——整机燃料消耗量，kg/h；

P_e——内燃机有效功率，kW。

参照燃油内燃机燃油消耗率的定义，燃料电池系统氢气消耗率可定义为：每小时单位有效功率消耗的燃料量，单位为 g/(kW·h)。

则燃料电池系统氢气消耗率的公式为

$$\text{燃料电池系统氢气消耗率(g/(kW·h))} = \frac{\text{氢气消耗量(g/h)}}{\text{燃料电池系统输出功率(kW)}} \tag{9-14}$$

9.3 燃料电池系统试验平台

9.3.1 燃料电池堆测试台架

关于燃料电池堆测试台架，目前主要有日本、加拿大、德国和美国等的制造商。世界上使用加拿大制造的燃料电池设备较多。加拿大 Hydrogenic 公司推出的几款燃料电池堆测试台架代表了国际燃料电池测试领域较高水平，具有测试精度高、控制准确、自动化程度高和安全性好等诸多优点。图 9-5 所示为该公司推出的 FCATS G7320 燃料电池堆测试台架。其测试系统的结构简图如图 9-6 所示。在该测试系统中试验用的空气来自无油空气压缩机输出的高压空气，氢气直接来自于高压气瓶。气体经过流量控



图 9-5 FCATS G7320 燃料电池堆测试台架

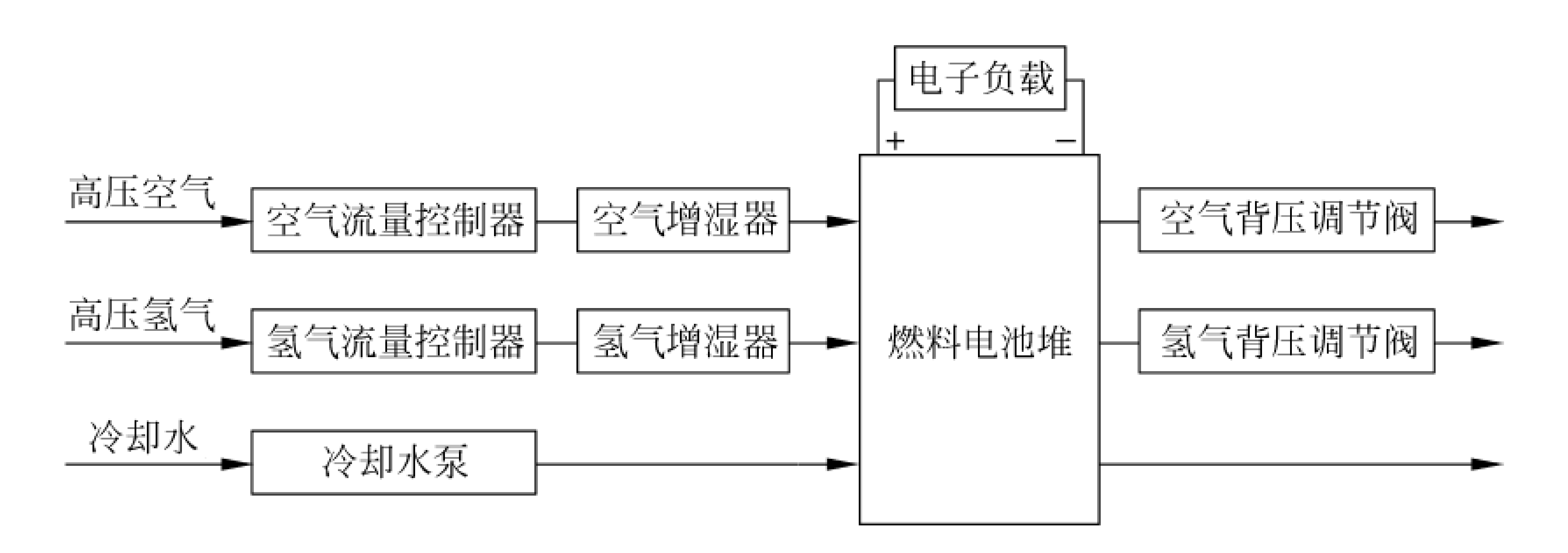


图 9-6　燃料电池堆测试系统的结构简图

制器后进入增湿器，增湿气体进入电堆反应，测试系统通过位于电堆出口处的背压调节阀来控制气体的反应压力，通过冷却水系统可以实现对电堆的温度控制，其主要特点可归纳如下：

(1) 该台架所有的操作都可以通过控制软件来实现，在软件中可以设定电堆各种操作参数值，还可以直观地向测试者显示所关心的数据，并且可以方便地把数据保存在计算机中。

(2) 操作者可根据试验要求编写相应的控制程序，使台架自动运行，极大地提高了测试的自动化程度。

(3) 该台架可采用大、小两个流量控制器对气体流量进行分档控制，从而可保证流量控制的准确性。

(4) 通过对冷却水温度和流量的精确控制来保证电堆工作温度的稳定。为了更精确地控制气体的入口温度，在进气管路上装有加热带。

(5) 台架的负载系统采用的是高精度的电子负载系统，该电子负载系统具有很好的控制精度和响应速度。

(6) 台架装备有最大测量通道为 64 路的单片电压采集系统，该系统具有采样频率快、测量精确度高等优点。

9.3.2　试验平台组成

燃料电池系统试验平台主要由两个部分组成，即测试系统和实验室环境系统。图 9-7 表示了该试验平台的基本组成，试验平台布置图如图 9-8 所示。从图中可看出：燃料电池系统放置于一个实验间(C 室)，氢燃料供应系统位于 C 室外北侧(详见图 9-9)，经过相应高压管道系统引入 C 室，并在 C 室进行减压处理进入燃料电池系统；动态负载系统则由车用电机及其控制器、动态测功机等组成，位于另一个实验间 A 室；其他动力系统部件——包括 DC/DC 变换器、起动蓄电池、燃料电池模拟装置等位于实验间 B 室；实验平台的测试系统由位于 C 室的现场测试计算机和位于 B 室的主计算机以及相应的传感器和调理电路组成；控制系统由位于 A 实验室(主控室)的 ECU 完成。

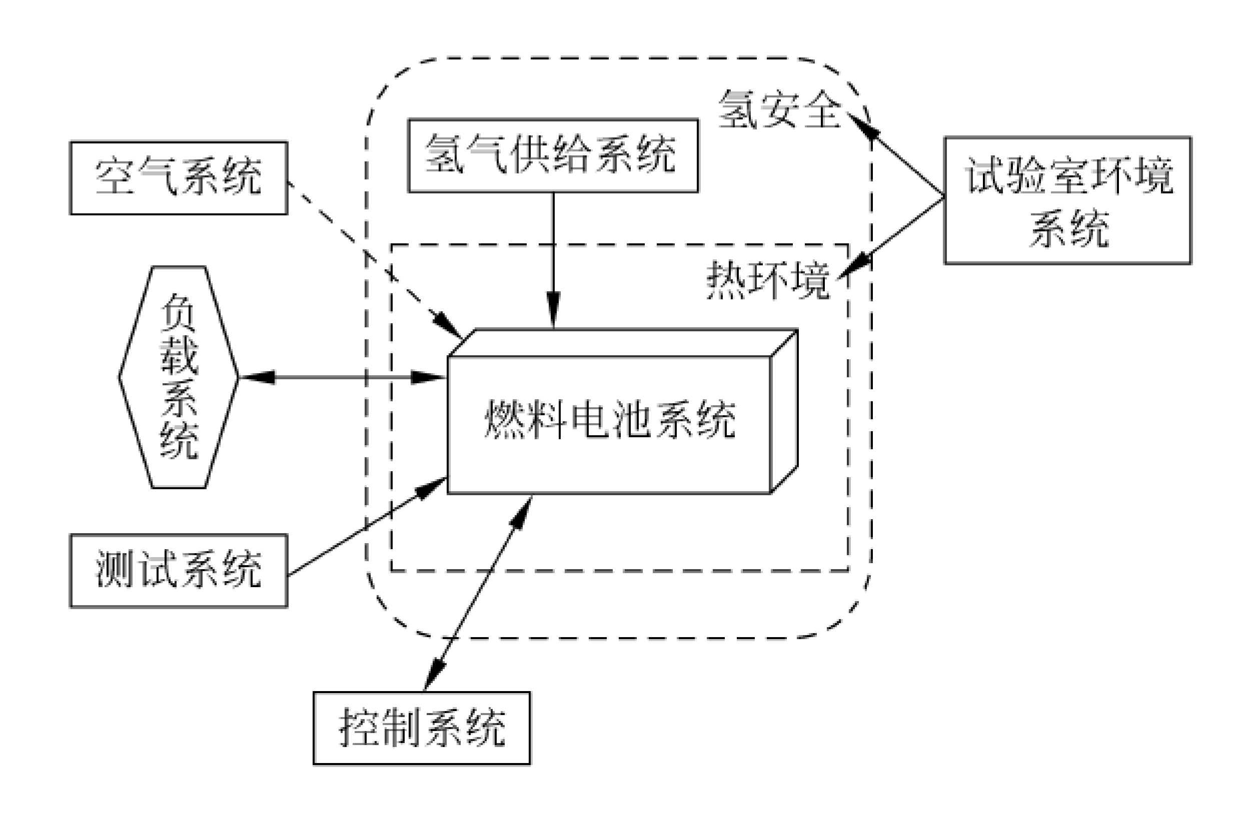


图 9-7 燃料电池动力系统实验平台主要组成示意图

图 9-8 燃料电池系统试验平台布置图

这样一套完整的试验平台可以对燃料电池系统进行起动性能、稳态工况测试、动态工况和模拟道路工况测试。当进行负载电机输出特性测试、试验研究时，就相当于对燃料电池动力系统进行性能测试和试验研究。

1. 测试系统

测试系统主要包括电动负载系统、燃料(氢气)与空气供给系统、控制系统与数据采集系统。电动负载系统用于消耗燃料电池的功率；燃料(氢气)供给系统和氧气(空气)供给系统的任务是向燃料电池系统提供燃料和氧化剂，并回收未完全反应的氢气；数据采集系统用于采集环境和燃料电池系统状态参数；控制系统根据测试要求协调测试系统的各个子系统。下面重点介绍燃料供给系统和电动负载系统。

1) 燃料供给系统

燃料供给系统是燃料电池系统实验平台非常重要的组成部分。目前，该系统分常压系统和高压系统。不管是常压型 PEM 燃料电池系统，还是高压型系统，实验室氢源均是储氢罐，一般它提供纯度为 99.99%的 15～13 MPa 压缩氢气。可靠的氢燃料供给系统是试验台安全运行的关键，它主要由压缩氢气瓶组、输送管道、机械阀门、电磁阀、过滤器、压力表及压力传感器、氢气质量流量计、氮气吹扫系统、氢气放空系统(含阻火器)等组成。整个实验室燃料供给系统如图 9-9 所示。

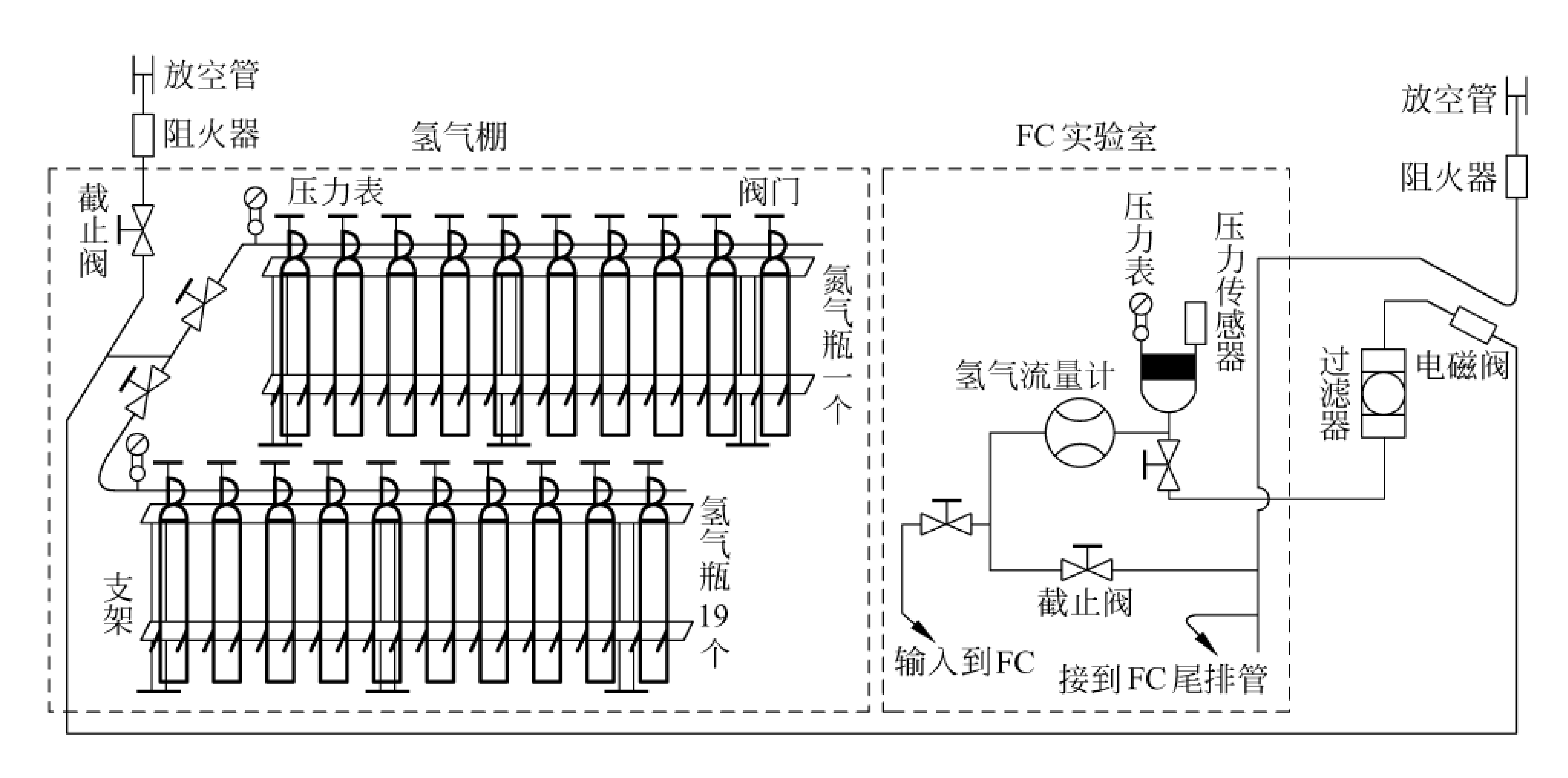


图 9-9　燃料电池系统试验台燃料供给系统框图

其中的氢气质量流量计可直接测量氢能源供应系统的氢气瞬时质量流量和累积质量流量，测量精度为 0.5%，且其测量精度不受氢气压力变化的影响，响应时间为 0.2 s，氢流量计量程为 8 kg/h。

氢供应管路中的安全电磁阀为常闭型，由氢安全报警处理系统控制，当燃料电池实验间氢气浓度达到Ⅲ级报警设定值(氢气浓度达到其燃烧下限的 50%，即体积浓度约为 2.0%)

时，报警处理系统自动关闭电磁阀(为安全起见，还需设有手动开关。这样，也可随时手动关闭)，切断氢气供应。

在燃料电池系统实验间内需设计安装一个氢气减压阀，该减压阀可将氢气压力从15～13 MPa降到2.5 MPa以下，以满足不同燃料电池系统试验的需要；在低压管道上可接入氢气质量流量计，提高氢气流量测量的准确性。

氮气吹扫系统、氢气放空系统(含阻火器)主要是根据氢供给系统的安全性要求而设计。实验前，通过氮气吹扫系统来检查气密性并吹扫氢气管路内残留的空气，以免氢气与空气在管路内形成预混的可燃混合气体；氢气放空系统(含阻火器)用于排出剩余的氢气和其他气体，以满足系统的安全性要求。

2) 电动负载系统

燃料电池系统的电动负载系统主要包括主控制器、主DC/DC变换器、负载交流异步电动机、电机驱动器和测功机，其原理图如图9-10所示。燃料电池系统输出的直流电压通过DC/DC变换器稳压后送到电机驱动器(当燃料电池系统的输出电压范围在负载电机的范围内时可以不经过DC/DC变换器)，驱动器将直流电变换为交流电，驱动异步电动机旋转。测功机把电动机的机械能转换为电能输送回电网，同时实现了系统的加载。为实现动态测试，测功机应选用动态响应好的交流电力测功机。

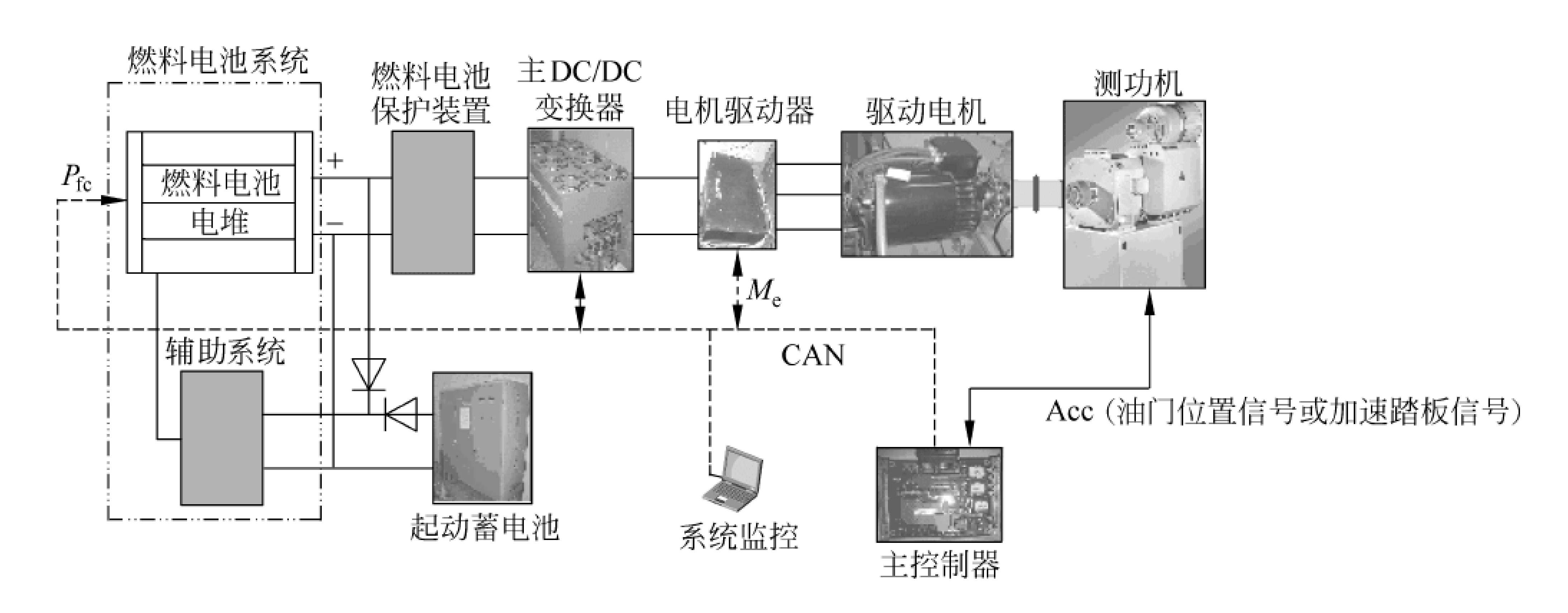


图9-10 某燃料电池系统电动负载系统

整个系统由控制系统通过CAN总线实现通信和控制。数据采集系统通过安装在燃料电池系统、电机等各子系统入口和出口的传感器采集燃料电池系统各参数值，并由计算机计算某些间接测量的性能参数，比如燃料电池系统的功率、效率、氢气消耗率等，然后存储、显示测试的参数。

测试模式一般有三种：一是恒扭矩模式；二是恒转速模式；三是道路动态工况测试模式。根据不同的要求选择不同的测试模式。

恒扭矩模式是保证测功机阻力矩不变，通过改变电机转速来达到一定的负载功率。由

于负载恒扭矩模式与驱动电机(尤其是用在汽车上的电机)在某些区域的特性不能很好匹配,所以,在燃料电池系统的测试中应用较少。

恒转速模式是保持测功机(一般是交流电力测功机)转速恒定,通过改变电机扭矩达到一定的负载功率。恒转速模式的测试过程为:先将测功机稳定在某一转速上,接着主控制器根据测试工况的要求,通过 CAN 总线给燃料电池系统发需求功率指令 P_{fc},给电机发需求扭矩指令 M_e。电机输出的机械能由测功机转化为电能反馈回电网。

2. 实验室环境系统

实验室环境系统主要包括实验室热环境系统和实验室氢安全系统等。实验室热环境系统是通过防爆送风机采用强制通风系统来模拟车辆在路面行驶的热环境条件。氢安全系统主要用于对氢燃料供应系统和燃料电池系统实验室的安全探测与报警处理等。图 9-11 是燃料电池系统实验室氢安全系统示意图。

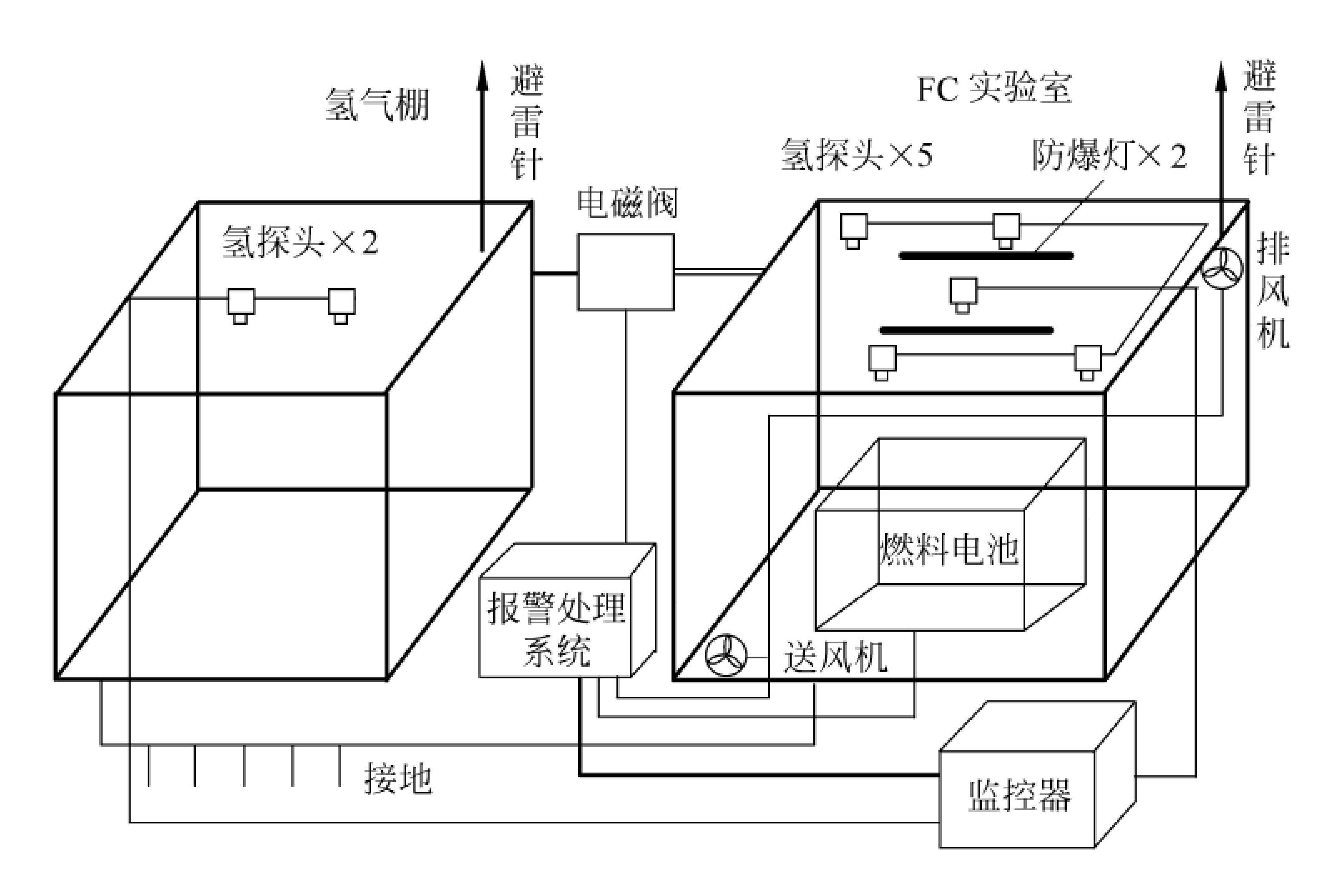


图 9-11　燃料电池系统实验室的氢安全系统

3. 冷起动试验系统

燃料电池电堆低温(0℃以下)起动试验系统主要由测试台架、进气预冷系统、环境舱组成。测试台架的主要功能是为燃料电池电堆运行提供反应气体(氢气和空气)和冷却系统,与常规燃料电池测试台架相同;进气预冷装置的功能是将测试台架供给的气体温度降低到试验所需温度,以保证低温起动过程不受进气温度影响;环境舱的功能是提供试验所需要的低温环境。其测试系统配有用于测试燃料电池起动过程时的氢气、空气、冷却液进出口温度、压力、电堆温度、电堆起动过程时的电压、电流传感器。图 9-12 是燃料电池堆冷起动测试系统示意图。

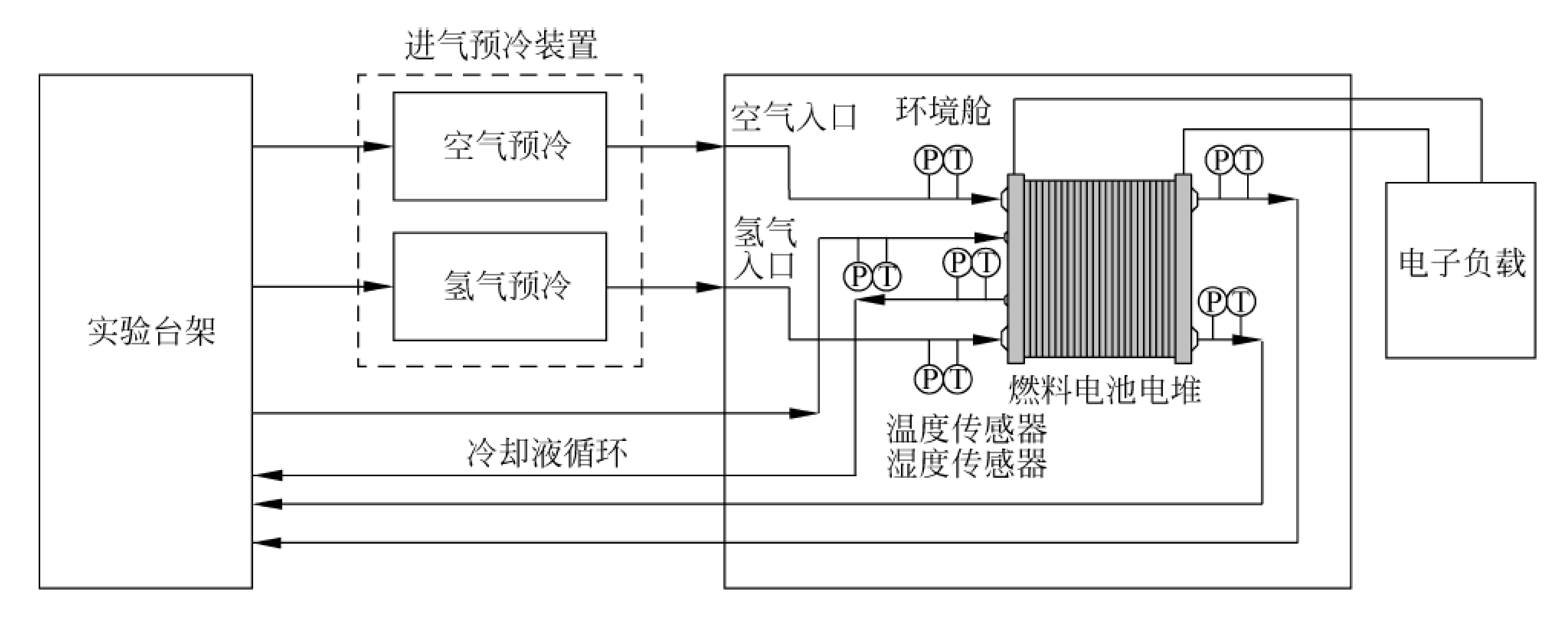


图 9-12 燃料电池堆冷起动测试系统示意图

9.4 燃料电池系统主要试验内容

燃料电池系统试验内容包括伏安特性试验、工况法试验、起动试验、过载试验、冷机加载试验等。以下的章节将对其典型试验进行重点介绍，在介绍试验内容前首先介绍其相关术语。

9.4.1 术语定义

(1) 工况：燃料电池系统工作状态，以功率为标志。

(2) 额定工况：试制方用于标示燃料电池系统能保持某一确定时间内正常运转的最大功率指标所对应的工况。

(3) 燃料电池系统有效功率：燃料电池堆输出功率减去燃料电池系统辅助系统消耗功率所剩的功率，即燃料电池系统净输出功率，单位 kW。

(4) 额定功率：在额定工况时的有效功率，燃料电池系统能够在此功率下持续工作一定时间，目前规定 1 h，单位 kW。

(5) 过载功率：在超过额定功率的负载情况下按规定运行时间进行试验时，燃料电池系统和电池堆所能达到的功率。这里规定运行时间 3 min，并强调输出电压不低于指定的最低电压，单位 kW。

(6) 电池堆效率：燃料电池堆单位时间内所消耗燃料的能量转化为输出功率的份额，单位%。

(7) 燃料电池系统效率：燃料电池系统单位时间内所消耗燃料的能量转化为有效功率的份额，规定以氢气低热值(LHV)计算，单位%。

(8) 燃料电池系统体积比功率：燃料电池系统单位体积的有效功率，也称体积功率密度，单位 kW/L。

(9) 燃料电池系统质量比功率：燃料电池系统有效功率与燃料电池系统质量之比，单位 kW/kg。

(10) 怠速工况：能维持自身工作，而不对外输出功率的工况。

(11) 待机状态：燃料电池系统试验前准备工作就绪，可随时接收起动命令进行起动的状态。

(12) 起动时间：燃料电池系统由待机状态起动至怠速工况所经历的时间，单位 s。

(13) 燃料消耗量：燃料电池系统单位时间内消耗的燃料量，单位 g/h。

(14) 燃料消耗率：单位有效功率运行一小时所消耗的燃料量，单位 g/(kW·h)。

(15) 加速时间：燃料电池系统从小功率工况或怠速工况加载到大功率工况所经历的时间。规定以加载信号起点为开始，至燃料电池系统功率达到目标为止的时间段作为加速时间，单位 s。

(16) 燃料电池系统工作噪声：在燃料电池系统某工况工作时，在其周围所能测到的最大噪声，单位 dB。

(17) 负荷率：当前工况下燃料电池系统有效功率与额定功率之比，单位%。

9.4.2　燃料电池系统性能试验

1. 试验内容

燃料电池系统性能试验主要包含以下几个方面内容。

(1) 常温起动试验。起动性能是汽车燃料电池系统的一项重要指标，常温起动试验的目的是检测燃料电池系统在环境温度 0～40℃(目前的测试条件)条件下的起动特性及燃料电池系统起动至怠速工况所需的时间。其起动过程是，燃料电池系统在接收起动信号后，首先由蓄电池带动空压机工作，向燃料电池供给反应所需的空气，氢气和空气在电堆中进行反应产生电能；接着使用电堆产生的电功率与蓄电池一起带动空压机继续工作，直到燃料电池产生的功率能够单独维持燃料电池系统自身工作(此时电动机不工作)，标志着起动成功。此时，蓄电池的输出电流为零。

(2) 工况法试验。所谓工况法试验是指燃料电池系统在各种不同工况下连续工作，比如怠速工况、部分负荷工况、额定工况、冷机加载工况和过载工况等。工况法试验的目的是通过连续运行工况的测试，检测燃料电池系统在怠速、部分负荷和额定工况下的性能，检测燃料电池系统的过载能力及冷机加载能力，从而获得燃料电池系统综合的伏安特性、功率特性、燃料经济性、效率特性和动态响应特性等基本性能指标，同时还可得到燃料电池系统的水管理、热管理和冷机加载能力等指标。如果燃料电池系统的水管理增湿能力差，它能维持的怠速工况时间就短；如果水热管理能力差，能维持的额定工况时间就短。

(3) 环境温度适应性试验。环境适应性试验是考核燃料电池系统在不同环境条件下是否能有效工作。如在高温、高寒、高湿、高原环境下燃料电池系统是否能正常起动，动力性、经济性是否能满足车用燃料电池使用要求，因此对燃料电池系统的环境温度适应性考核就

显得非常重要。通过考核系统在极限环境下的起动与运行特性，可确定系统对环境的适应性。

（4）过载工况试验。该试验的目的是考核燃料电池系统的过载能力，以检验系统是否能适应燃料电池汽车起步加速、爬坡、超车等过载工况的要求。

（5）冷机加载试验。该试验是燃料电池系统在常温情况下起动后马上进行加载，从怠速直接加载到燃料电池系统所能达到的最大功率时的测试，用于考核燃料电池系统的冷机加载能力和动态响应时间。

（6）可靠性试验。该试验的目的是考核燃料电池系统性能的稳定性、可靠性，了解目前研发的燃料电池系统的寿命及存在的问题。因此可靠性试验循环工况的制定是非常重要的。汽车用燃料电池系统的可靠性试验方法可借鉴汽车用燃油内燃机可靠性试验方法。

（7）燃料电池系统绝缘性测试。燃料电池系统是一个发电装置，对绝缘电阻、水电导率和密封性方面都有严格的要求，这与燃油内燃机有很大不同，因此，在进行燃料电池系统性能试验时，安全性检测是不可忽视的一个重要方面。其测试方法可参考国标 GB/T 18384.1—2001《电动汽车 安全要求 第 1 部分：车载储能装置》和 GB/T 18384.3—2001《电动汽车 安全要求 第 3 部分：人员触电防护》规定的方法进行测试。

2. 试验方法

关于燃料电池堆及系统试验内容及方法有很多，有些正在探讨中，本节重点介绍作者所在单位组织过的燃料电池堆及系统的起动试验方法、怠速试验方法、额定工况试验方法等。试验对象为 50～80 kW 燃料电池系统。

1）常温起动性能测试

在 0～40℃环境条件下，进行燃料电池系统常温起动性能测试时，起动前不允许预热。起动成功并怠速运转 15 s 后停机。连续起动 3 次，每次间隔时间不少于 5 min。同时记录环境温度、环境湿度、进气温度、进气压力、冷却液温度、起动时间，记录起动过程中电池堆输出电流、电池堆输出电压、蓄电池向空压机供电电流随时间变化的历程。

图 9-13～图 9-15 表示的是某 50 kW 燃料电池系统 3 次起动试验过程，试验时的环境温度为 9℃，湿度 42%，大气压力 0.1 MPa。

从图 9-13～图 9-15 中可以看出燃料电池的起动时间，即该燃料电池系统在 7 s 内就可以完成起动过程。约 4 s 之内，蓄电池输出电流将达到最大值，而后其输出电流逐渐下降至零，此时电堆输出电压逐渐增大，经过约 1.6 s 后，系统完全切换至燃料电池系统自供电状态，此时端电压约为 260 V。从图 9-14 还可以看出初始维持约 1.5 s 的约 20 V 电堆端电压是由残留氢气产生的，当氢气消耗完后，电堆端电压为零。

通过 3 次起动得到的试验曲线还可以看出，3 次起动试验的起动时间逐次减少，这可说明预热后的燃料电池系统起动性能更好。同时说明燃料电池系统在较低的温度下（9℃）具有良好的起动性能，目前国际上先进的燃料电池系统能在－30℃下顺利起动，并且起动时间大大缩短。

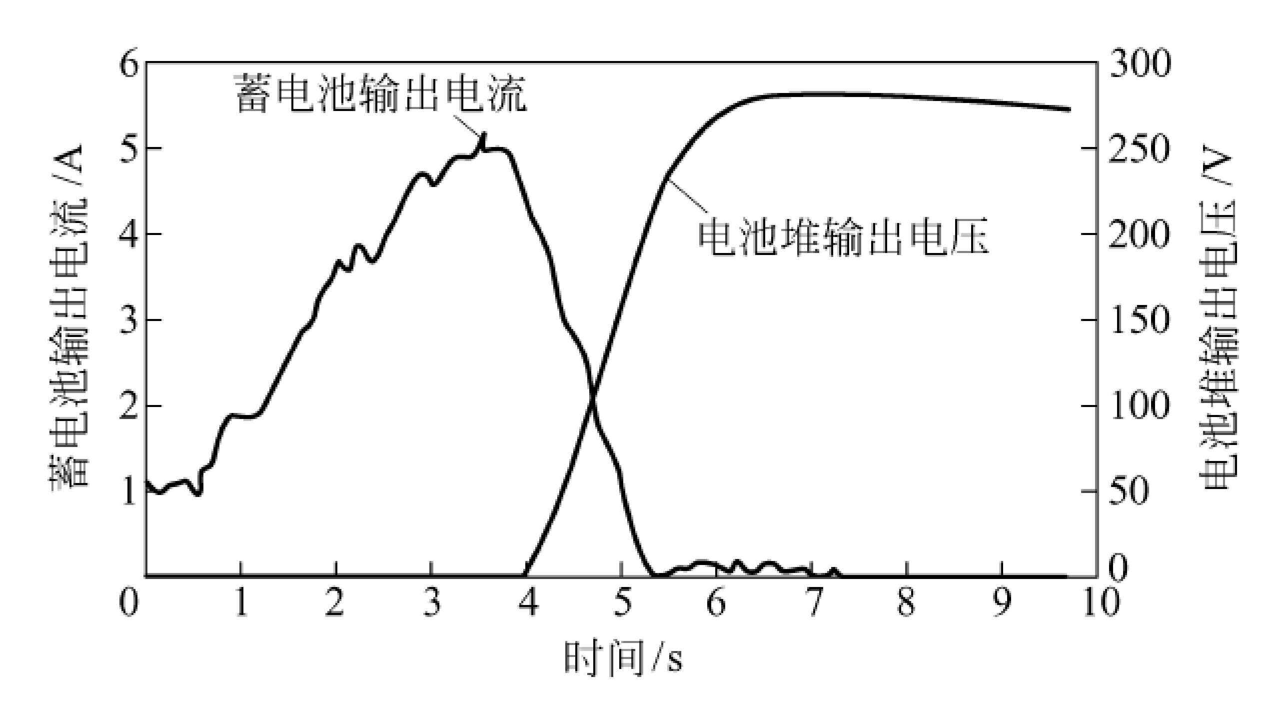


图 9-13　燃料电池系统第一次起动性能试验曲线

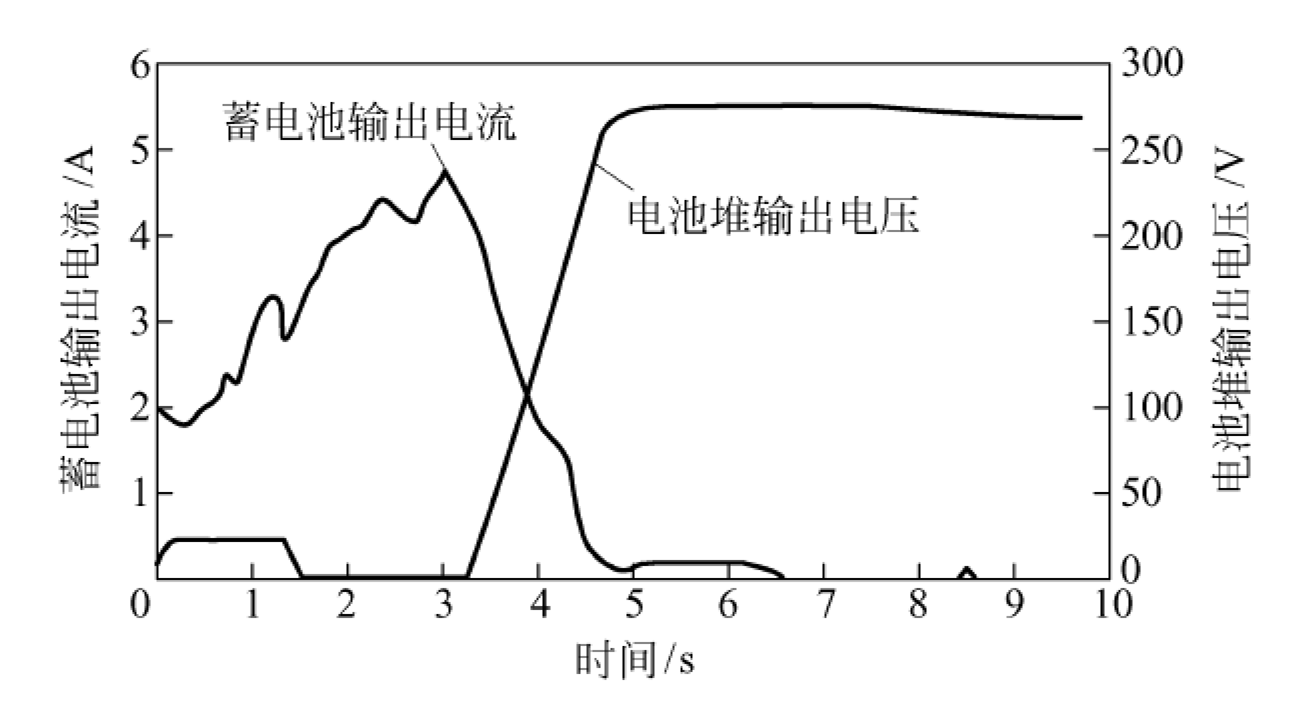


图 9-14　燃料电池系统第二次起动性能试验曲线

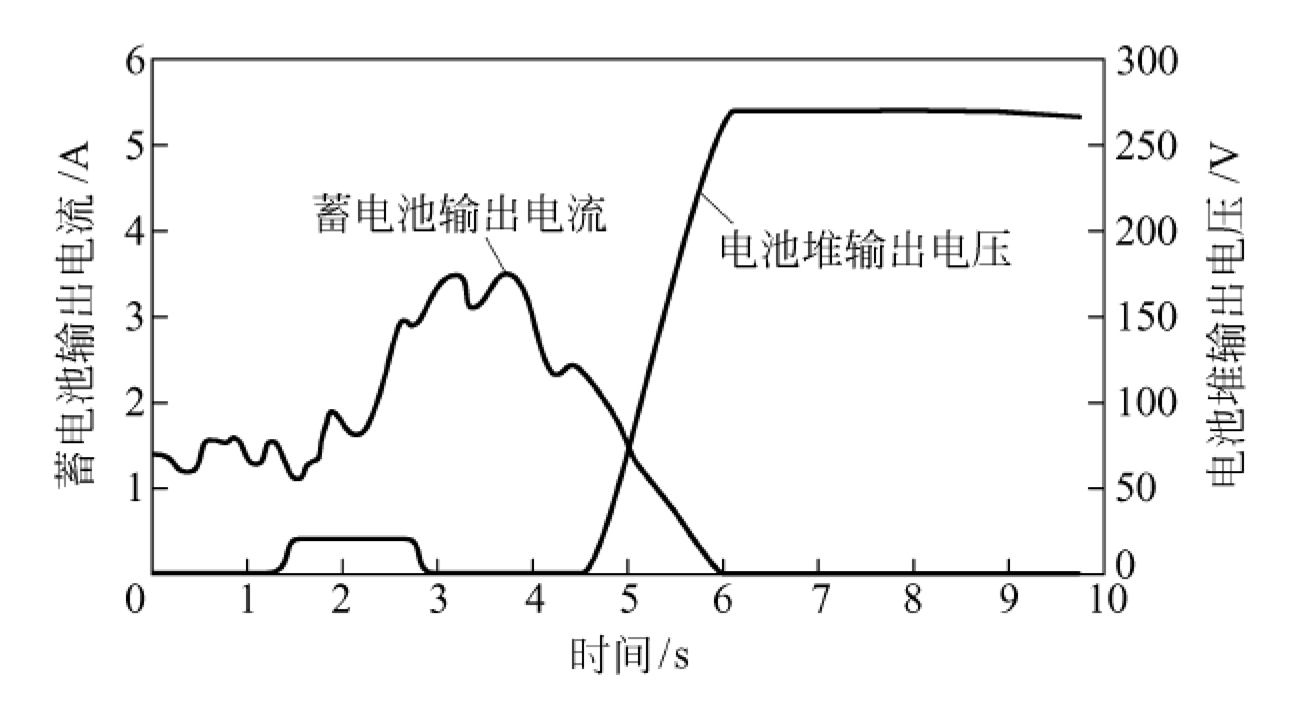


图 9-15　燃料电池系统第三次起动性能试验曲线

2）低温起动性能试验

当质子交换膜燃料电池处于低于 0℃环境下时，燃料电池工作产生的水（液态水）会发生结冰。在电池内的温度上升到 0℃之前，催化剂层的水如果发生结冰，电化学反应将会因反应域的冰封而停止，使燃料电池起动困难，或起动失败。同时冰的形成由于体积膨胀可能会对膜电极组建的结构产生破坏。因此，燃料电池 0℃以下环境下的起动性能是评价燃料

电池性能的重要指标之一。

低温起动试验基本过程如下。

(1) 试验前准备

① 额定工况稳态运行。为了保证燃料电池电堆能够正常工作以及在低温起动后与之对比，一般在低温起动前按照额定工况操作条件(冷却水温度、压力，氢气、空气的进气温度、湿度、过量比、背压)下运行，稳态运行 30 min。

② 停机吹扫。燃料电池运行 30 min 后降载停机，接着对电堆进行吹扫。所谓吹扫是将电堆内的液态水排出电堆，以保证电堆在降温至 0℃以下时不会出现因为冰冻膨胀破坏膜电极甚至电堆结构。

一般使用干气(氮气)对燃料电池电堆阴极和阳极分别进行吹扫，目的是为了除去燃料电池内部过多的水，提高低温起动过程电堆的储水能力，减少起动过程结冰量。为了检查电堆内含水状态，可使用专用仪器，实时测量高频阻抗值(HFR)或交流阻抗；也有研究者使用中子成像方法，用于测量液态水和冰。此方法适用于起动过程中测量液态水和冰的生成，不适用于吹扫过程。

③ 电堆降温。电堆置于环境舱内，起动环境舱，设置环境舱温度为目标试验温度。待确认电堆温度降低到所需温度后，维持环境舱在该温度并静置 12 h。

④ 供气(氢气和空气)。起动试验之前，先开启气体预冷器，温度同样设置为目标试验温度，等待预冷器温度降低到试验温度。

打开测试台架供气系统，向燃料电池电堆供给氢气和空气。

(2) 低温起动过程

为保证电堆顺利起动，低温起动过程要求产热功率值应大于散热功率值，使电堆温度逐步上升，当温度超过 0℃时，电堆内所产生的水不再冻结，进而不影响传质，实现电堆冷起动。实现这一过程的基本方法是降低气体计量比，加大加载电流密度。

冷起动后需在怠速状态下持续稳定运行 10 min，同时记录电堆的电流、电压、单片电压，氢气、空气进排气温度、压力，冷却水进出口温度、压力，电堆温度，环境舱温度，电堆高频阻抗值。根据起动数据计算燃料电池电堆温度从起动温度到 0℃所需时间，从起动温度到正常工作温度所需时间，从起动温度到 50%额定功率所需时间；起动过程能耗和氢气消耗量；起动过程电堆总发热量；起动前吹扫耗气量。

图 9-16 是上汽 36 kW 燃料电池系统在－10℃低温下电堆的起动过程中的电堆电压、电流随时间的变化情况。图 9-17 是上汽额定功率为 43 kW 的燃料电池系统在－20℃下低温起动过程中电堆的输出功率、电压、电流和出口冷却液温度变化情况。

通过测试台架控制电子负载逐渐减载到零，停止气体供给，用氮气吹扫至符合停机要求。设置环境舱温度为室温，等待温度上升到设定温度，关闭试验系统。

3) 怠速工况试验

对于燃料电池系统，怠速工况是指能维持自身工作而不输出功率的工况。此时燃料电池堆单片电压约为 0.9 V。怠速工况对城市汽车燃料电池系统来说是很典型的工况。在这

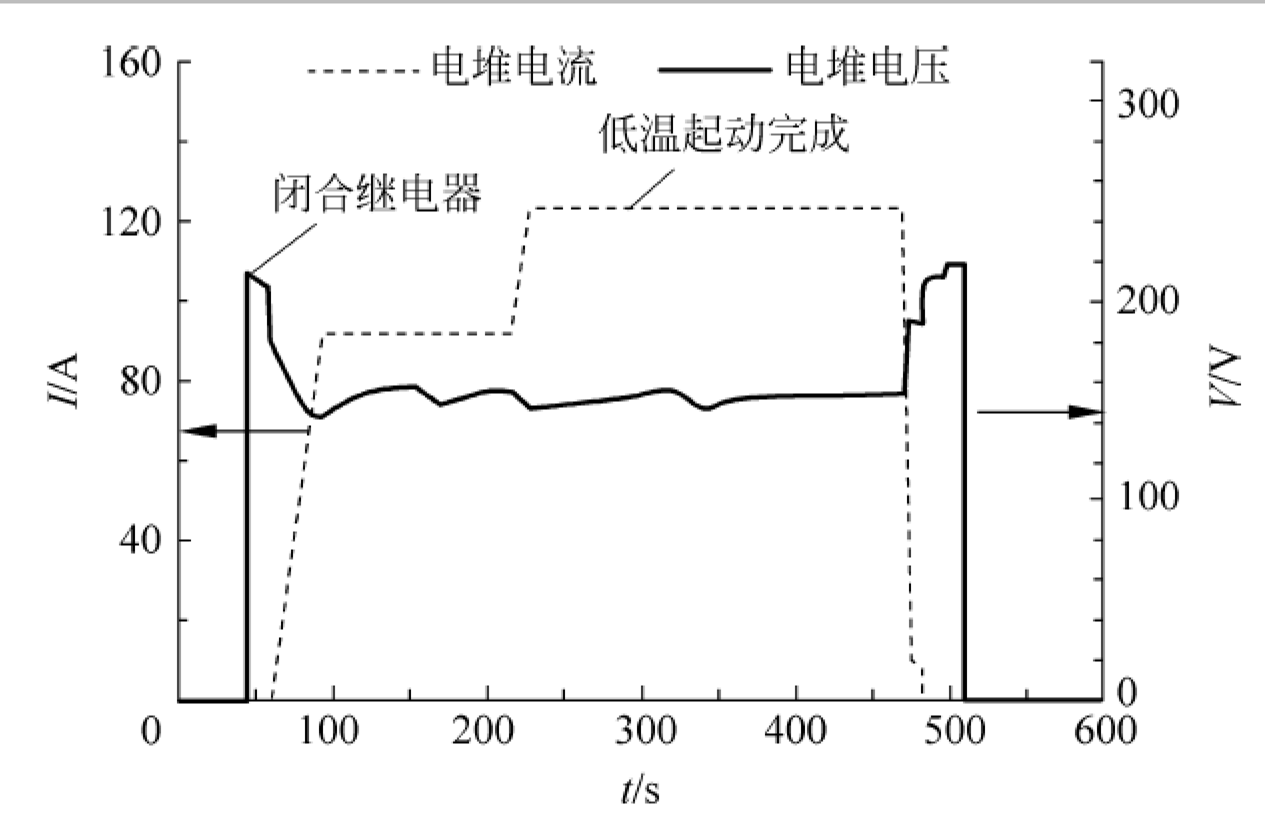


图 9-16　－10℃低温起动过程中电堆电压和电流的变化情况[5]

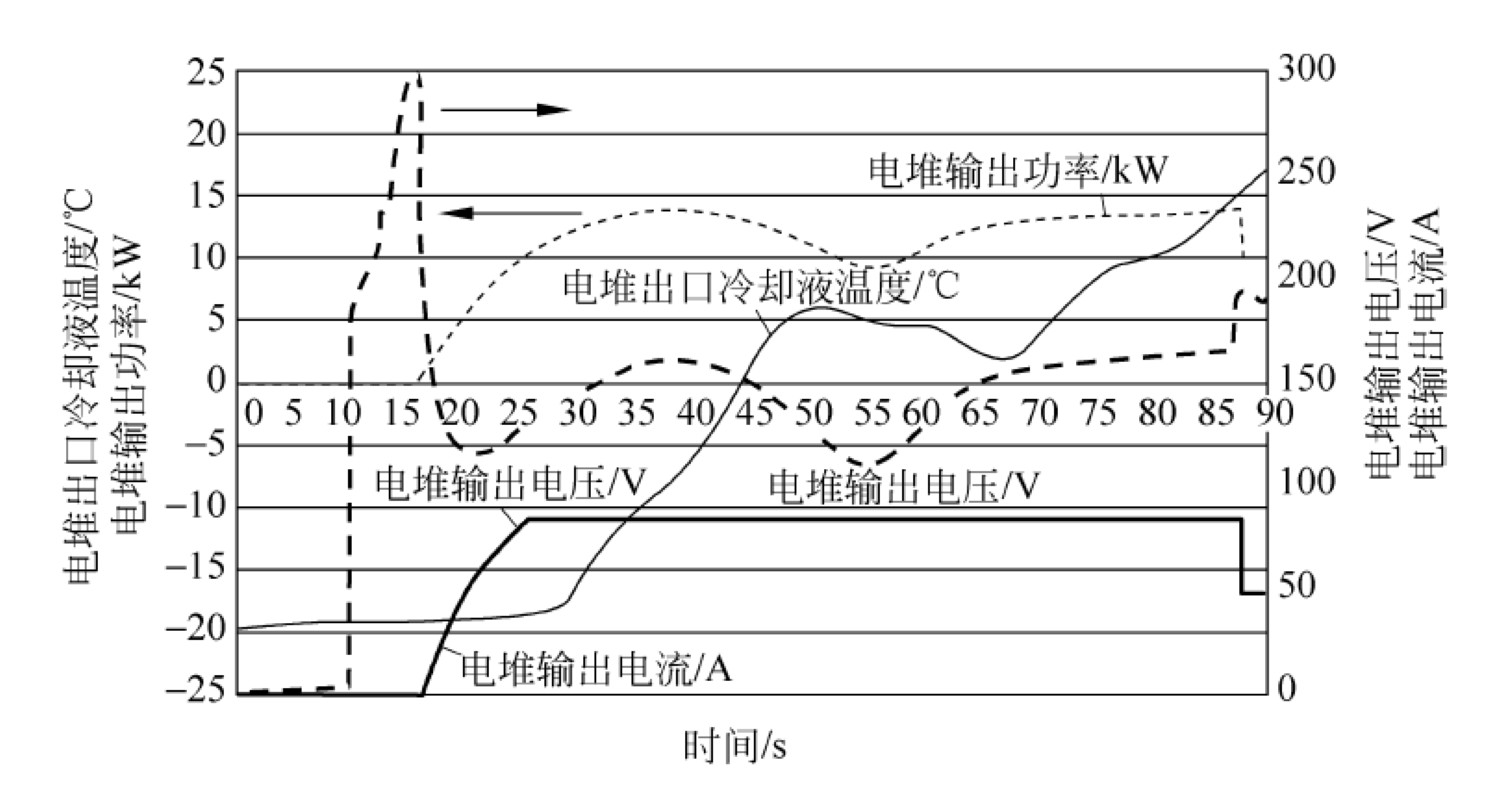


图 9-17　燃料电池堆－20℃低温起动过程[6]

种工况下，由于燃料电池电堆空气过量系数较大，且生成水少，很容易导致质子交换膜变干，电堆性能下降。因此，在怠速工况下，需重点测量湿度、空气过量系数及进气压力对电堆性能的影响。

另外燃料电池系统的水管理能力也反映了它所能维持的怠速时间，稳定的怠速时间是汽车能源动力很重要的指标。因此，为考察燃料电池的水管理能力需要进行一定时间(时间根据试验对象来确定)的怠速工况试验，试验中需记录燃料电池电压随时间的变化情况。

如果燃料电池系统水管理能力差，它所能维持的怠速工况时间就短。

作为例子，图 9-18 给出了某燃料电池堆(约 10 kW)在不同增湿温度下怠速性能(电压)的变化情况。增湿温度为 40℃时，怠速电压下降最大(约 1.4 V)，说明电堆在这种情况下稳定性最差，即增湿温度越低，电堆性能下降越快(电堆电压有最低电压限值，详见参考文献[1,2])。图 9-19 表示了过量空气系数对某燃料电池堆(约 10 kW)怠速性能的影响。空气过量系数过高，电堆的电压下降过快，空气过量系数过低，电堆起始电压较低，因此，空气过量系数过高或过低对电池的性能均有明显影响。

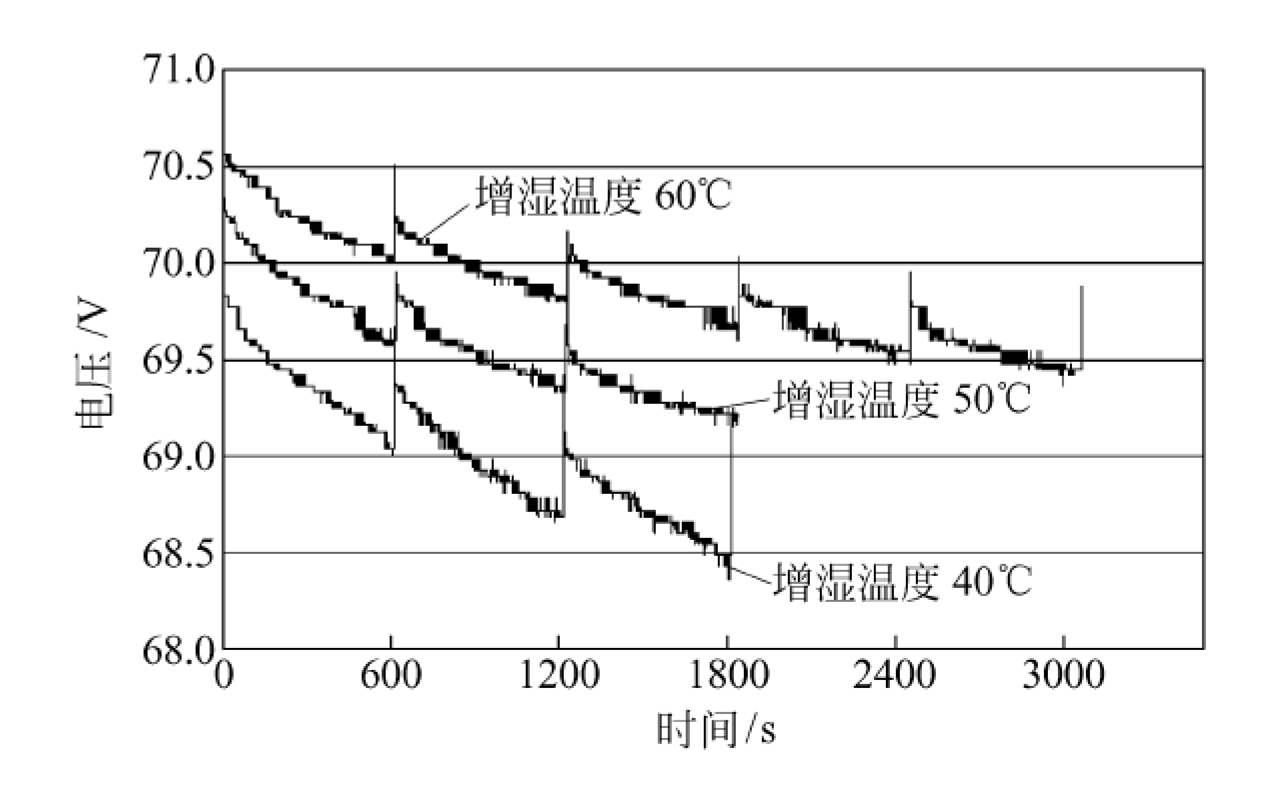


图 9-18 不同增湿温度对某燃料电池怠速性能的影响

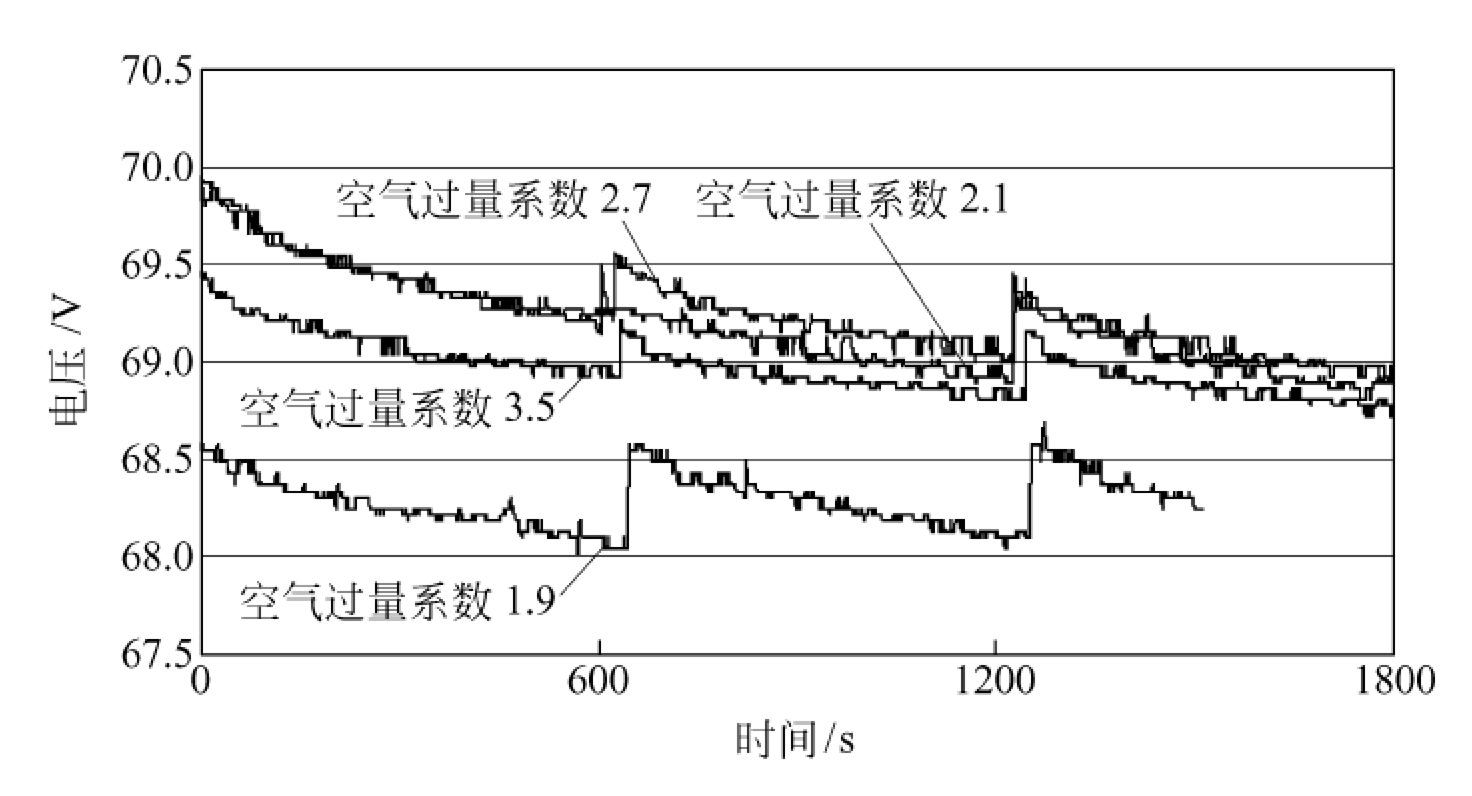


图 9-19 空气过量系数对某燃料电池堆怠速性能的影响

4）额定工况试验

额定工况一般是指燃料电池电堆单片电压为 0.7 V 时输出的电流。在额定工况时，燃料电池电堆反应会生成大量液态水，导致阴极扩散层氧传质速度降低，增加浓差极化，降低电池性能。因此，在额定工况下，需重点考察燃料电池的水热管理能力，即需要测试不同增湿温度对电堆性能的影响。

额定工况稳定运行时间的长短也是重要的指标，考核时间要求不少于额定功率定义中所规定的时间，譬如 30 min 功率、1 h 功率等。此种测试用于考核燃料电池堆的热平衡能力、水管理能力和工作稳定性。

图 9-20 给出了某燃料电池堆在不同增湿温度下的额定工况性能。从图中可看出，随着燃料电池堆工作时间的增加，电堆电压下降并不多，说明电堆在额定工况时，在电堆湿度较高的情况下，电堆没有发生严重的水淹现象。但其电压却伴随着周期性波动，且增湿温度越高，波动幅度越大。其主要原因是空气流量在控制范围内是周期性波动的，这就相当于在电堆内进行周期性的吹扫，因此导致电堆的电压也呈周期性的波动。另外也可以说明电堆内存在积水现象，并且电压的连续波动是因为局部积水造成的。

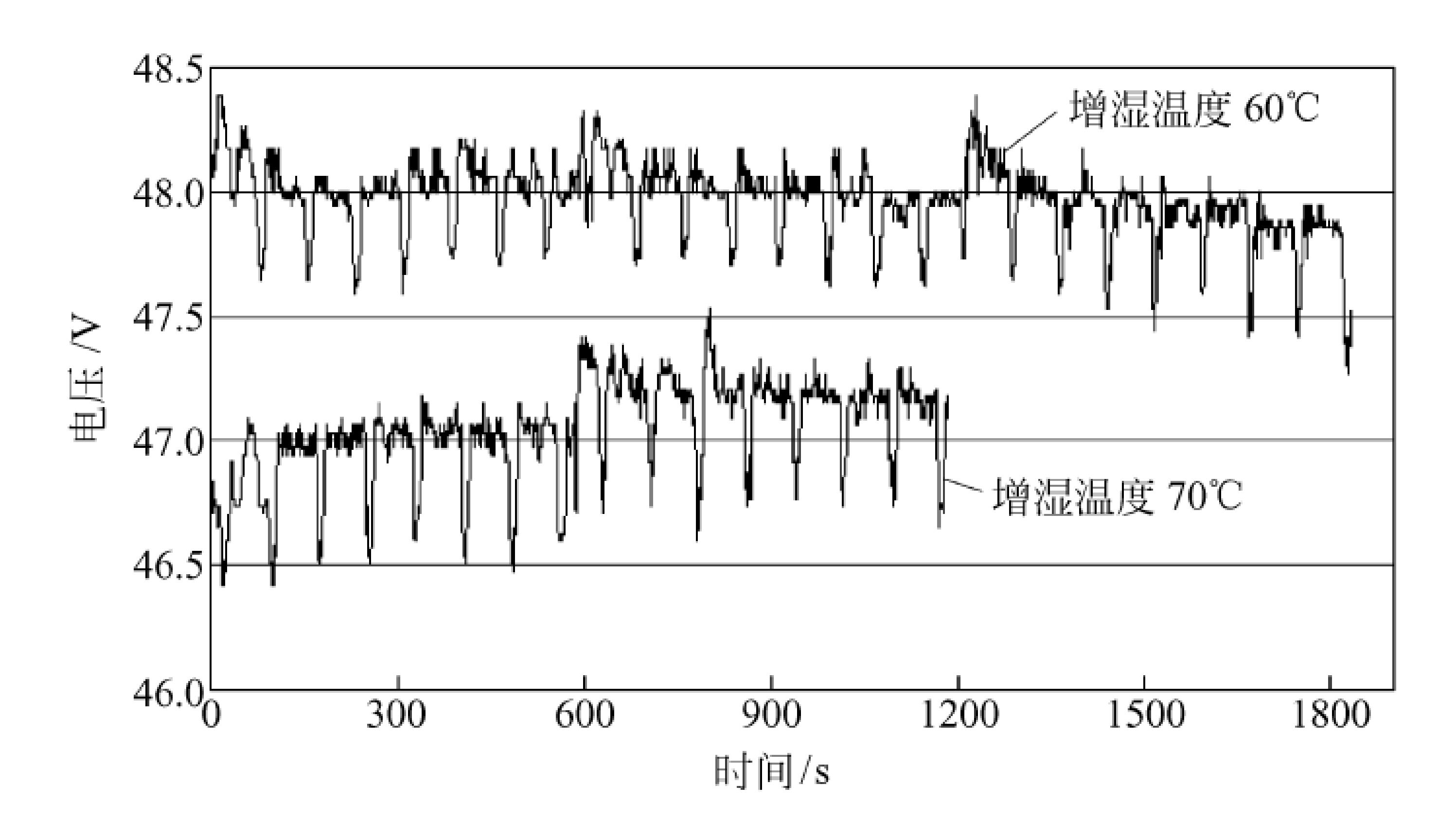


图 9-20　不同增湿温度对燃料电池堆额定工况性能的影响

5）工况法试验

燃料电池系统工况法试验就是模拟车用燃料电池在道路上的行驶情况，选择一系列有代表性的工况进行连续运行的试验。它与燃油内燃机工况法试验类似，只不过试验目的主要侧重评估燃料电池系统的动力性、电压稳定性、经济性等综合性能，而与排放无关。因此燃料电池工况法由燃料电池的不同工况组成，包括怠速工况、部分负荷工况、额定工况、冷机加载工况和过载工况等。

工况法试验时燃料电池系统按给定的工况连续运行。在各个运行工况，分别测取氢气消耗量、电池堆的输出电流和电压、燃料电池系统净输出的电流和电压；测量空压机或鼓风机的功耗；记录进气温度、进气压力、冷却循环水进出口温度、环境温度和湿度等；在额定工况和过载工况时，记录燃料电池系统输出电流和电压随时间变化的历程。测试后按一定的计算方法，可以得到燃料电池系统及电堆的伏安特性、效率、功率等指标。因此，通过工况法试验能综合测试和评价燃料电池系统性能。

工况法制定时，将根据试验目的不同而设有不同数目的工况，如 9 工况、13 工况等（工况的选择及试验方法会随着燃料电池系统技术水平的提高，而不断进行修正）。目前国家标准制定的工况法测试采用的是 13 工况，如表 9-1 所示。通常，研发单位为提高燃料电池系统各项性能指标及寿命，在进行内部考核时均加大对燃料电池系统各项性能指标的考核力度，也就是说采用的检测标准要高于国家标准。如图 9-21 所示为某城市大客车燃料电池系统考核工况图。

表 9-1　燃料电池系统试验工况与运行时间（GB/T 28183—2011）

工况号	工况名称	负荷率	稳定时间/min
1	起动后怠速	0	1
2	冷机加载	由制造商给定	3
3	怠速	0	15
4	部分负荷	20%	3

续表

工况号	工况名称	负荷率	稳定时间/min
5	部分负荷	40%	3
6	部分负荷	60%	3
7	部分负荷	80%	3
8	额定	100%	30
9	部分负荷	30%	30
10	过载	由制造商给定	3
11	部分负荷	50%	3
12	部分负荷	25%	10
13	部分负荷	10%	3

注：按制造商的要求设定加载速度。

下面以图 9-21 为例简要介绍燃料电池系统试验方法及部分试验结果。

燃料电池系统按给定工况(如表 9-2 所示)连续运行,试验过程如同前述。通过试验数据的整理至少可以得到以下性能曲线。

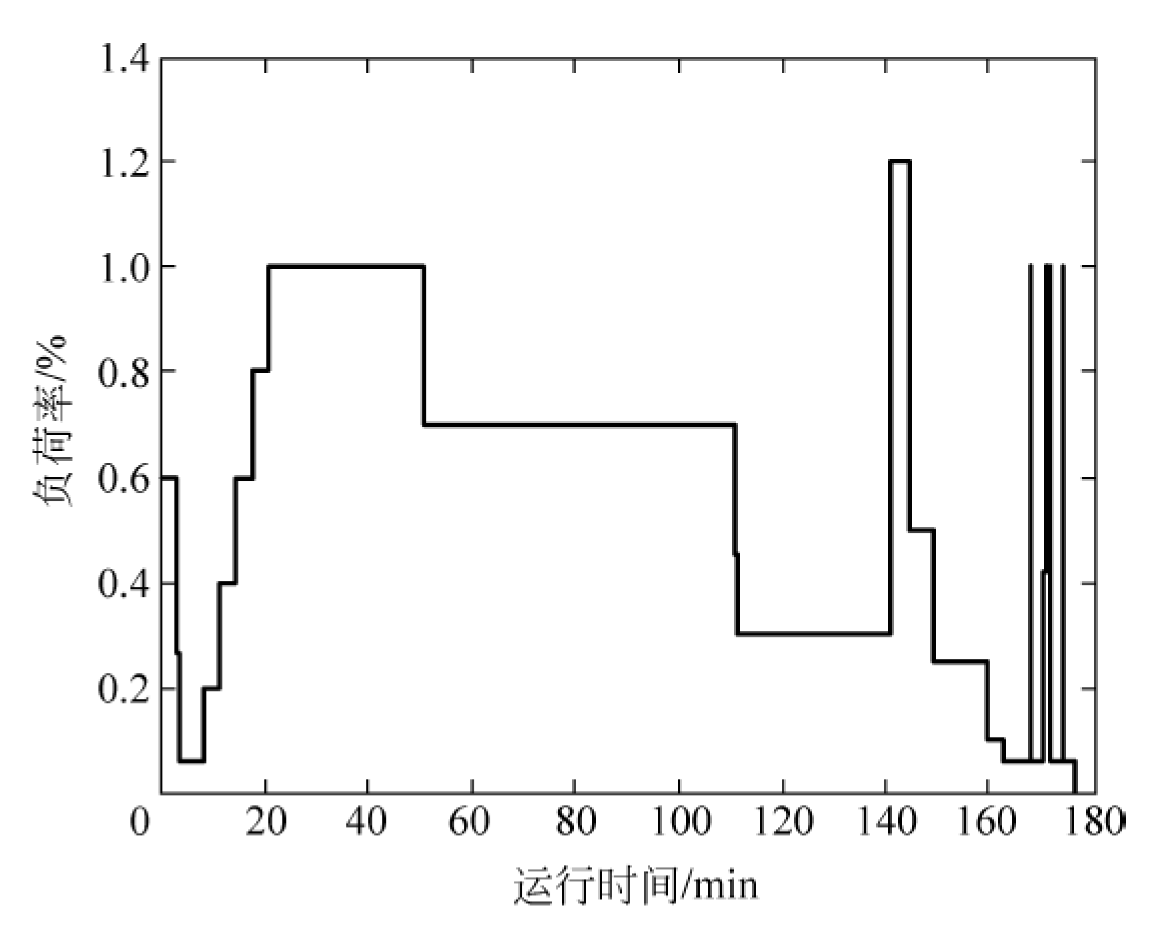


图 9-21 燃料电池系统试验工况图

(1) 工况法循环中燃料电池系统性能参数随时间变化曲线;

(2) 燃料电池堆和燃料电池系统的输出电压、功率、燃料消耗率、效率与电流的关系曲线图;

(3) 燃料电池系统伏安曲线;

(4) 氢气利用率对功率的曲线等。

表 9-2 燃料电池系统试验工况与运行时间

工况号	工况名称	负荷率/%	稳定时间/min
1	起动	0	—
2	冷机加载	最大输出能力	3
3	冷机怠速	6	5

续表

工况号	工况名称	负荷率/%	稳定时间/min
4	部分负荷	20	3
5	部分负荷	40	3
6	部分负荷	60	3
7	部分负荷	80	3
8	标定工况	100	30
9	部分负荷	70	60(如仅作性能评价　时间为 30)
10	部分负荷	30	30
11	过载工况	≥120	3
12	部分负荷	50	3
13	部分负荷	25	10
14	部分负荷	10	3
15	热机怠速	6	5
16	加速	100	0.5
17	怠速	6	2
18	加速	100	0.5
19	怠速	6	2
20	加速	100	0.5
21	怠速	6	2
22	时间共计		171.5

注：加载速度按制造商的要求设定。

图 9-22 给出了某燃料电池系统按表 9-2 工况运行时的功率随时间变化的情况；图 9-23 给出了额定工况下燃料电池系统电压的稳定性，可看出该燃料电池系统在额定工况下的电压稳定性较好；图 9-24 给出了某燃料电池系统伏安特性曲线，通过伏安特性曲线可了解其性能的变化规律。

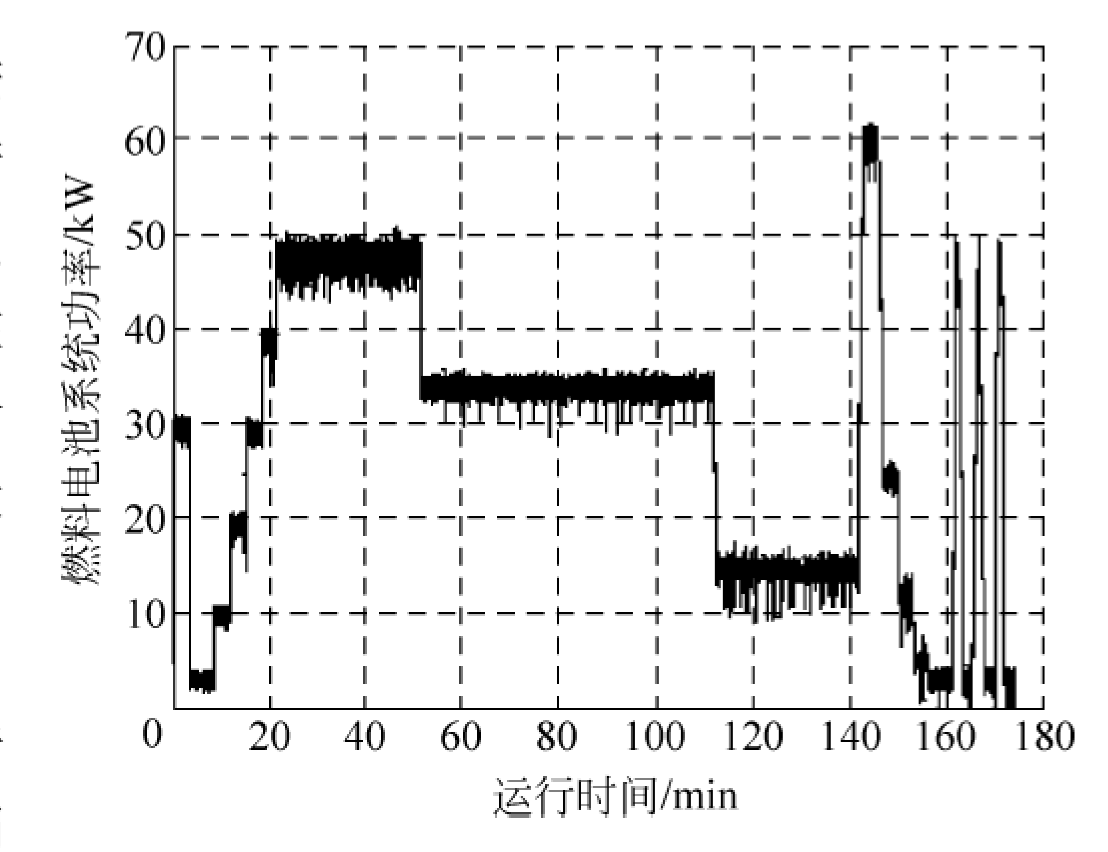


图 9-22　燃料电池系统功率随时间变化历程

6）燃料电池寿命试验

为了解某燃料电池系统寿命，就得进行寿命考核试验。根据燃料电池系统的使用目的不同，则考核方法也不同。对于客车用燃料电池系统，可参考表 9-2 所示的工况对燃料电池系统进行循环工况测试，如连续运行 50 个循环(根据需要增加测试循环数)。对每一循环的各工况分别测试燃料电池系统的输出电流和电压；记录进气温度、进气压力、冷却水温度、环境温度和湿度等。

随着燃料电池技术的发展，燃料电池寿命考核方法(如循环工况的设计、寿命评估等)也在不断完善，相关信息读者可参阅文献[10～14]及当下有关文献。

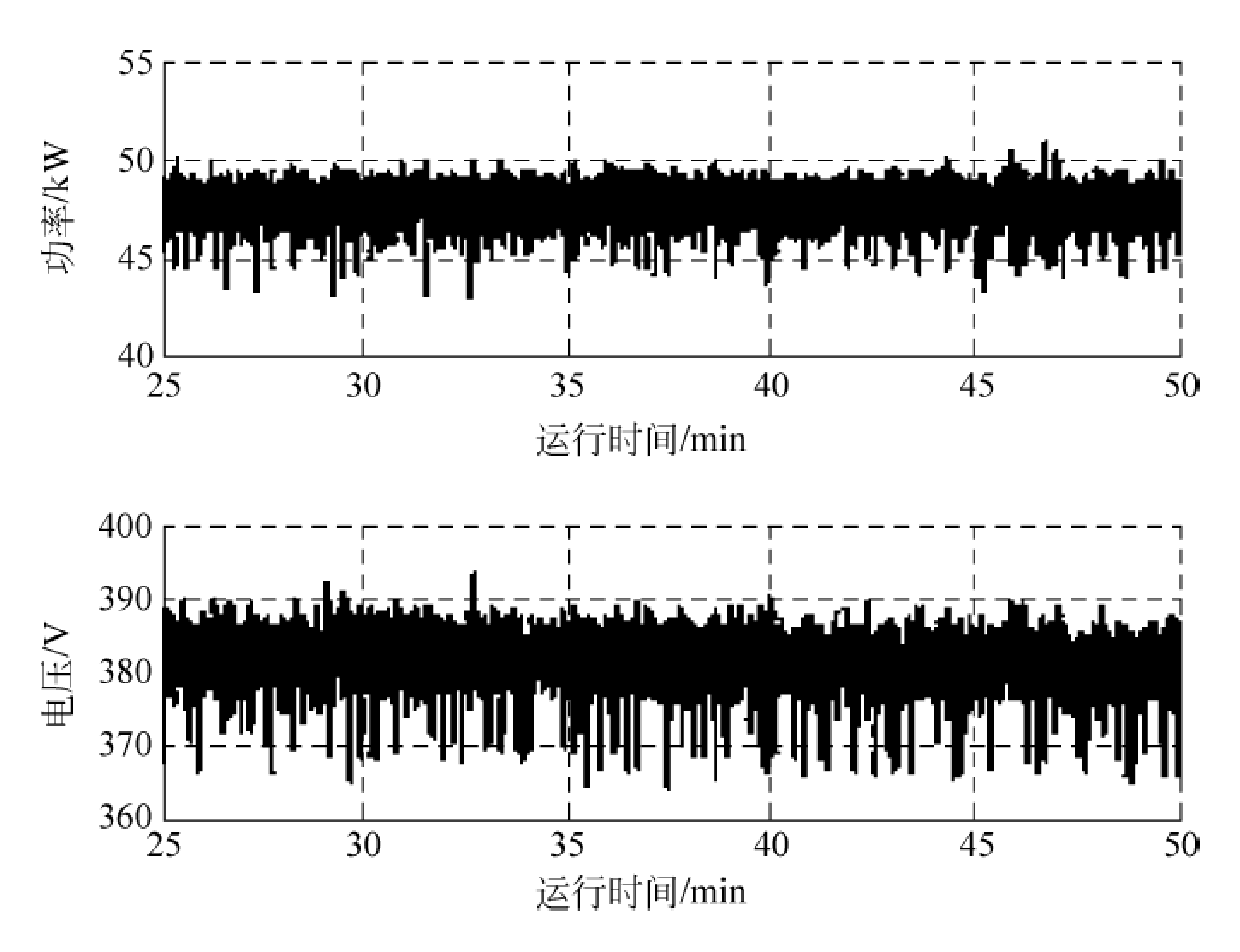


图 9-23 额定工况燃料电池系统电压稳定性

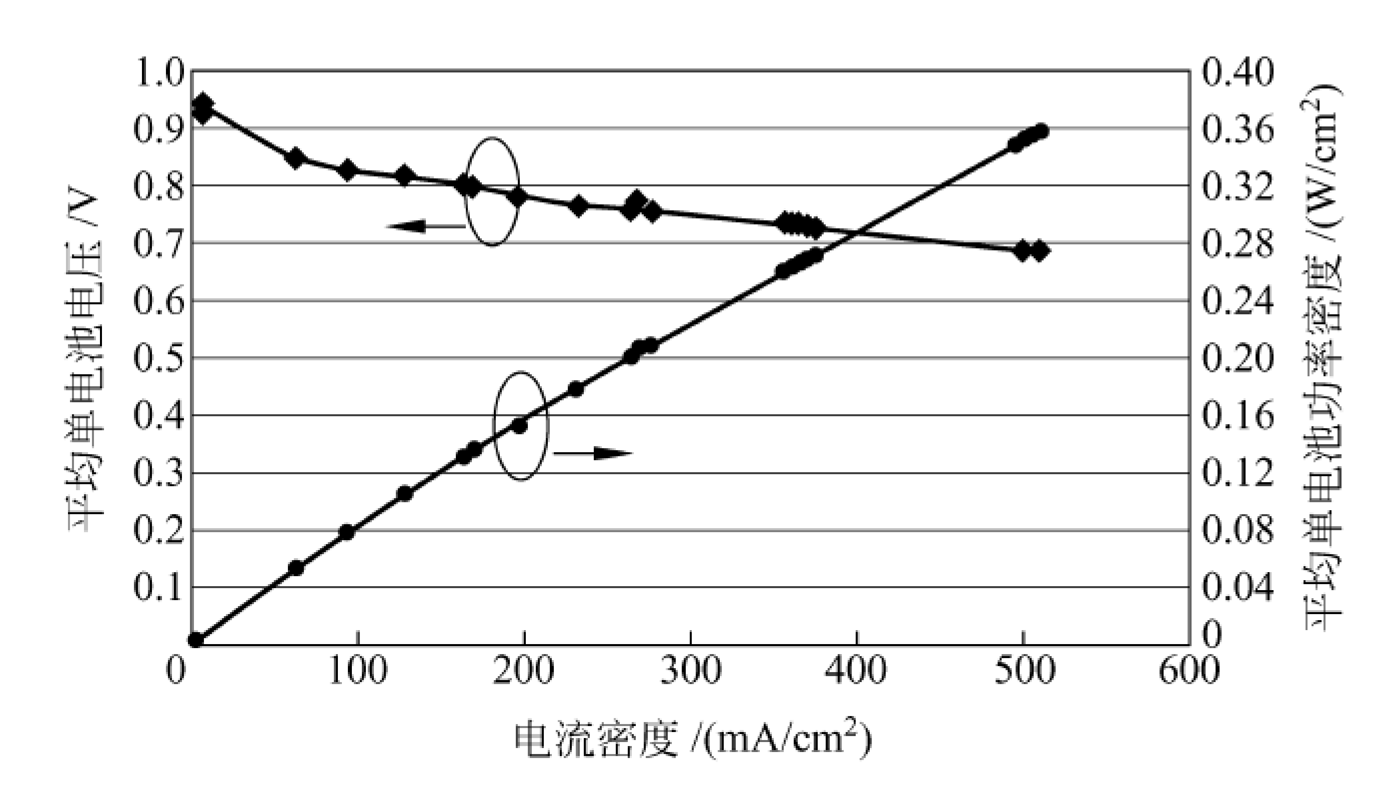


图 9-24 燃料电池系统平均单电池电压、功率密度随电流密度变化关系

根据试验结果画出每 50 循环前后燃料电池系统伏安特性曲线，比较性能变化。此外，循环试验过程中，如单片电压低于 0.3V 时，应停止试验。

9.4.3 燃料电池性能测试技术展望

燃料电池电堆是一个典型的多物理场耦合系统，内部传热传质和电化学过程复杂。理论上，在一定外部操作条件(如流量、压强、温度等)下，经过足够长时间后，燃料电池在一定电流下的输出电压是固定的。但在实际情况中，由于电堆内部气、水、热状态需要很长时间(几十分钟)才能达到平衡状态，受电堆内部气体扩散层、催化剂层和膜的状态影响，电堆特性与电堆的历史状态有关。如图 9-25 所示，在同样的操作条件下，随着电流加载、减载，相同电流下的电压并不相同。这种现象也被称为燃料电池的“滞回效应”。

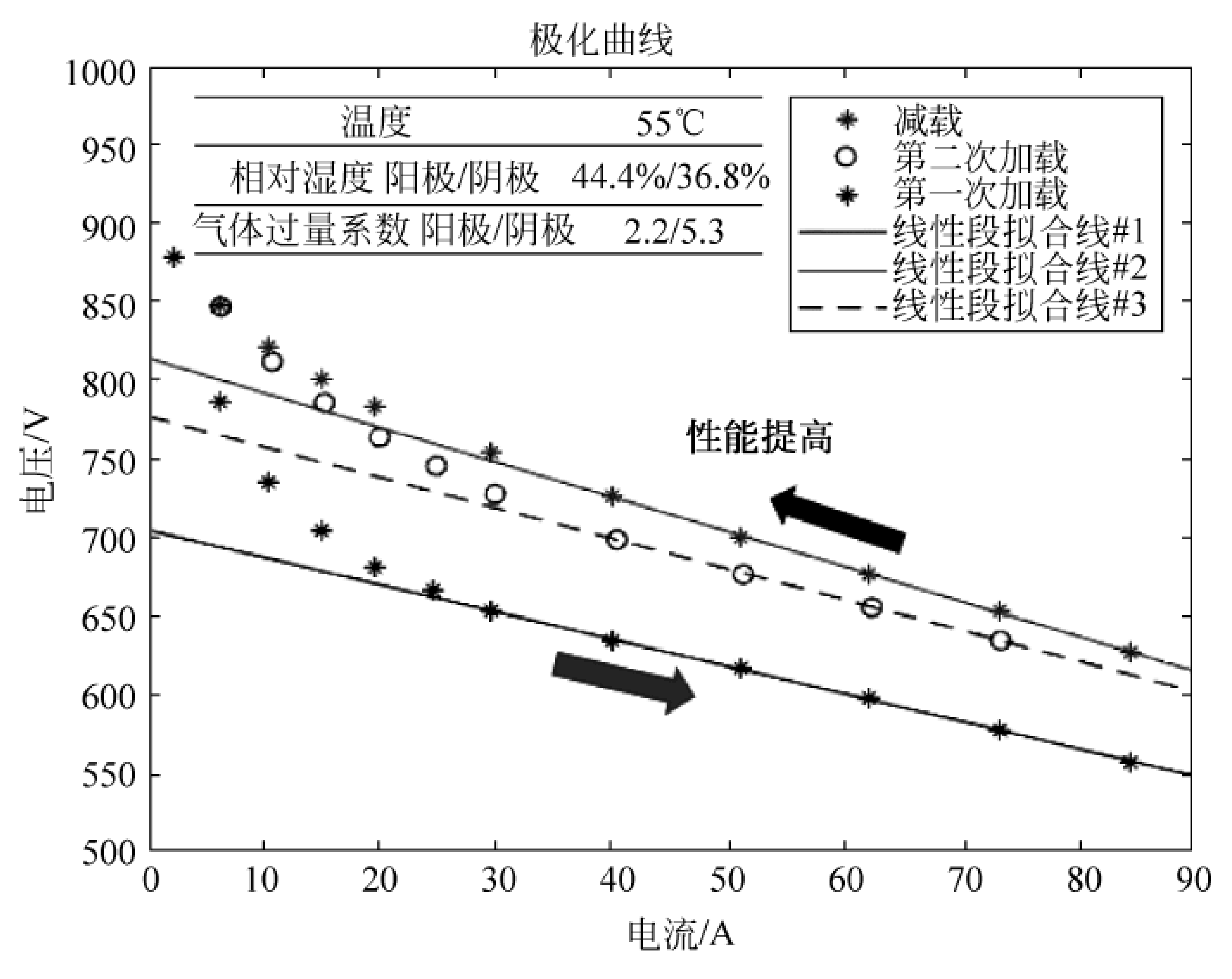


图 9-25　燃料电池"滞回效应"

1. 考虑滞回效应的燃料电池性能评价方法

滞回效应是质子交换膜燃料电池的基本特性，其本质是堆内传热传质过程，尤其是气液两相流传质过程导致电堆内部状态的切换过程远长于系统操作参数切换过程（前者为分钟级，后者为秒级）。目前大多数系统级建模、测试及分析方法，多未考虑堆内状态相对于操作参数的滞后效应，容易产生对电堆性能的"误判"。如何减少误判，提高对燃料电池性能评价的准确性？主要有两种方法：

方法一：延长系统测试时间，或对电堆进行反复加减载，确保电堆内部状态达到平衡。这种方法测试成本高，且如何界定测试时间、反复加载次数，也是个难点。

方法二：建立考虑堆内状态过程滞回效应的系统级模型，在有限时间内进行电堆性能测试，并通过模型来修正。这种方法测试成本低，但如何建立能反映堆内动态过程的模型，是个很大的挑战。

2. 堆内分布式状态在线测试方法

燃料电池电堆性能评价的难点在于，很难确定电堆内部是否已经达到平衡状态。为进一步提升燃料电池电堆性能，需要对燃料电池内部状态进行检测。当前，针对堆内电流密度、温度、水含量及气体组分，常见的检测方法如下。

（1）电流密度分布：单片分割法、感生磁场法、垫圈植入法、温度反推法等。

（2）温度：热电偶植入法、热敏电阻植入法、光纤光栅植入法、红外热成像法、激光吸收光谱法等。

（3）水含量：高频阻抗法、中子成像法、X 光成像法、核磁共振法、电导率法、红外吸收光谱法、电子显微法、荧光显微法、质谱仪采样法、滞留时间分布法、透明可视化法等。

（4）气体组分：质谱仪采样法等。

清华大学燃料电池动力系统课题组设计了一套“车用大面积燃料电池单体多通道气体组分在线采样系统”，其原理如图 9-26 所示。其系统由单片测试试验台、燃料电池多通道气体采样单片和气体采样系统组成。

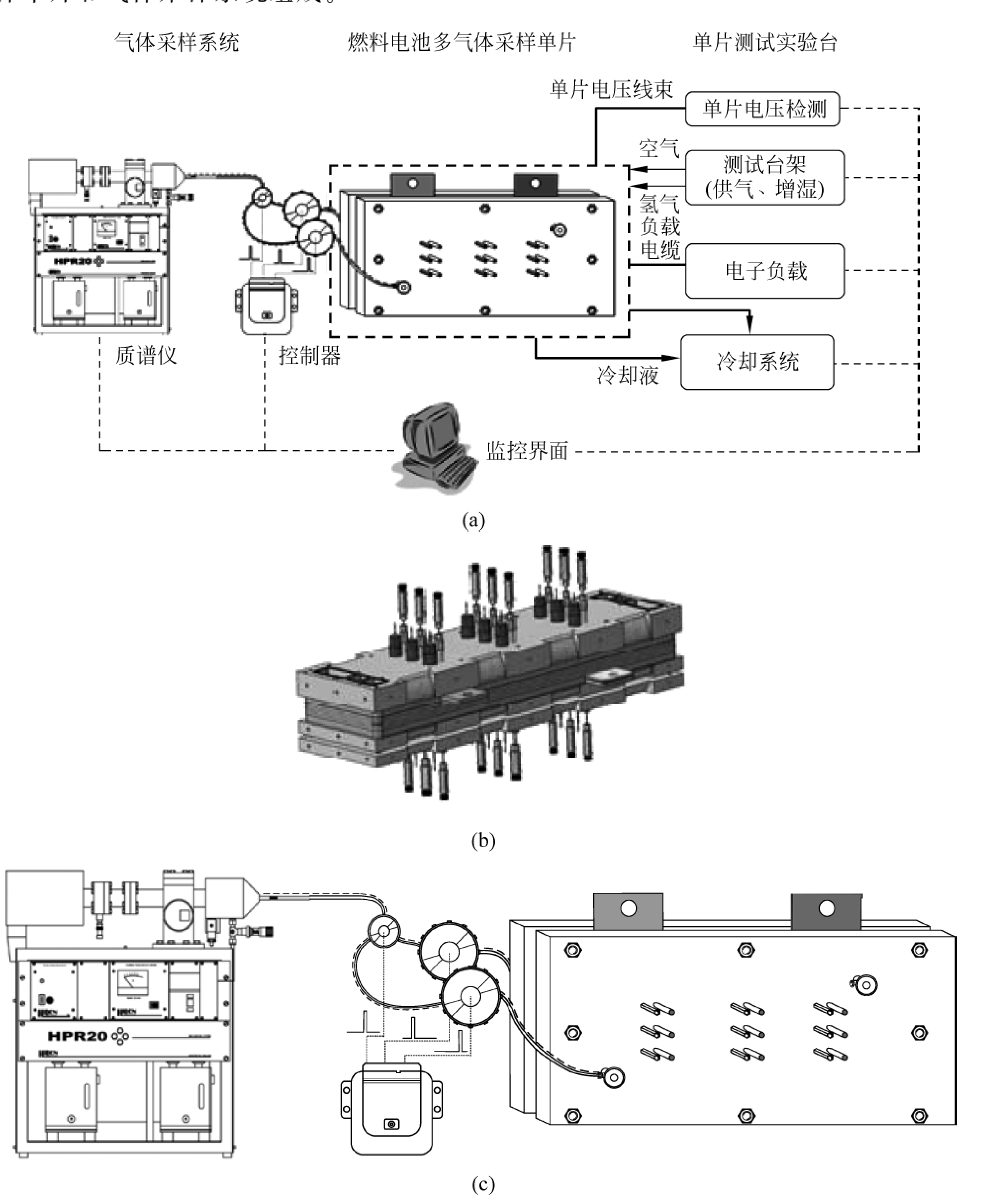


图 9-26 “车用大面积燃料电池单体多通道气体组分在线采样系统”原理图

（a）车用燃料电池大面积单片多通道气体组分在线采样系统；（b）带气体采样口的燃料电池单片；（c）多通道多气体组分采样系统

为解决大面积单片散热较差的问题，设计开发了可控制的冷却液流量和温度的冷却系统软硬件，该系统能将单片温度维持在合适的范围内。设计的监控系统控制程序在满足上述要求的同时，还能采集传感器信号，共享燃料电池测试台供气系统及增湿系统的数据，与单片电子负载通信，控制负载电流，与单片电压检测模块通信，并进行数据记录，实现系统数据有效融合和网络化控制。进一步信息读者可查阅文献[7,8]。

参考文献

[1] 衣宝廉. 燃料电池——原理、技术、应用[M]. 北京：化学工业出版社，2003.

[2] [英]詹姆斯・拉米尼，安德鲁・迪克斯. 燃料电池系统——原理・设计・应用[M]. 朱红，译. 北京：科学出版社，2006.

[3] 绍静玥，黄海燕，卢兰光. 燃料电池典型工况试验研究[J]. 汽车工程，2007(7)：566-569.

[4] 质子交换膜燃料电池发电系统低温特性测试方法：GB/T 33979—2017[S]. 2017.

[5] 陈沛，陈雪松. 车用质子交换膜燃料电池系统－10℃低温启动实验研究[J]. 汽车安全与节能学报，2016(4)：427-432.

[6] 汪飞杰. 燃料电池发动机－20℃冷启动研究[J]. 上海汽车，2017(8)：3-6.

[7] 方川，徐梁飞，黄海燕，等. 大活性面积燃料电池多通道气体在线采样系统[J]. 实技术与管理，2018，35：112-117.

[8] 方川，黄海燕，徐梁飞，等. 一种多功能燃料电池堆实验台的研发[J]. 汽车工程，2019(4)：361-365.

[9] LI J，HU Z，XU L，et al. Fuel cell system degradation analysis of a Chinese plug-in hybrid fuel cell city bus[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2016，41(34)：15295-15310.

[10] XU L，REIMER U，LI J，et al. Design of durability test protocol for vehicular fuel cell system operated in power follow mode based on statistic results of on-road data[J]. Journal of Power Sources，2018，377：59-69.

[11] XU L，LI J，REIMER U，et al. Methodology of designing durability test protocol for vehicular fuel cell system operated in soft run mode based on statistic results of on-road data[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2017，42：29840-29851.

[12] PEI P，CHANG Q，TANG T. A quick evaluation method for automotive fuel cell lifetime[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2008，33(14)：3829-3836.

[13] HU Z，XU L，LI J，et al. A reconstructed fuel cell life-prediction model for a fuel cell hybrid city bus[J]. Energy Conversion and Management，2018，156：723-732.

第10章 锂离子电池性能测试

10.1 概　　述

近年来,能源危机和环境污染等问题日益加剧,纯电动汽车、混合动力汽车等新能源汽车成为研究热点。动力电池是纯电动汽车的唯一动力源,也是混合动力汽车动力系统的核心部件,对电动汽车的发展起着至关重要的作用。目前,锂离子电池因具有能量密度高、功率密度大、寿命长、安全性好、环保等特点成为最主要的一种车用动力电池。

为了满足新能源车辆的动力需求,必须选择合适的动力电池;同时为保证动力电池在使用过程中高效、可靠、安全、耐久,需要开发电池管理系统对车用锂离子电池进行有效的管理与控制。在动力电池选型和电池管理系统的算法开发过程中,需要对电池的动力性、耐久性和安全性等各项基本性能具有全面的了解,为此需进行相应的锂离子电池性能测试。锂离子电池测试的对象为电池单体、模组和电池系统,中国已颁布了电池的测试评价相关标准,如电池单体和模组的性能测试标准 GB/T 31486—2015、功率型电池系统的性能测试标准 GB/T 31467.1—2015、能量型电池系统的性能测试标准 GB/T 31467.2—2015、电池(单体/模组/系统)寿命测试标准 GB/T 31484—2015、电池单体和模块的安全测试标准 GB/T 31485—2015、电池系统的安全测试标准 GB/T 31467.3—2015 等。本章简要介绍锂离子电池的工作原理与基本性能参数,着重介绍作者所在单位在电池管理系统开发过程中涉及的一些电池基本性能测试方法。

10.1.1 锂离子电池的基本结构

锂离子电池是一种二次电池,它的基本结构如图 10-1 所示,一般由电池的正极、负极、隔膜、电解质和外壳构成。电池的正、负极均由可以嵌入和脱出锂离子的化合物或材料组成。目前常用的正极材料有尖晶石结构的锰酸锂($LiMn_2O_4$,缩写 LMO)、橄榄石结构的磷酸铁锂($LiFePO_4$,缩写 LFP)和层状结构的三元材料($LiCo_xNi_yMn_{1-x-y}O_2$,缩写 NCM,或 $LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O_2$,缩写 NCA)等。常用的负极材料可以分为碳材料(如石墨)以及非碳

材料(如钛酸锂)等。锂离子电池电解质分为液体、固体和固液混合 3 类,目前锂离子动力电池一般采用有机液体电解质,其中,电解质锂盐为 $LiPF_6$。

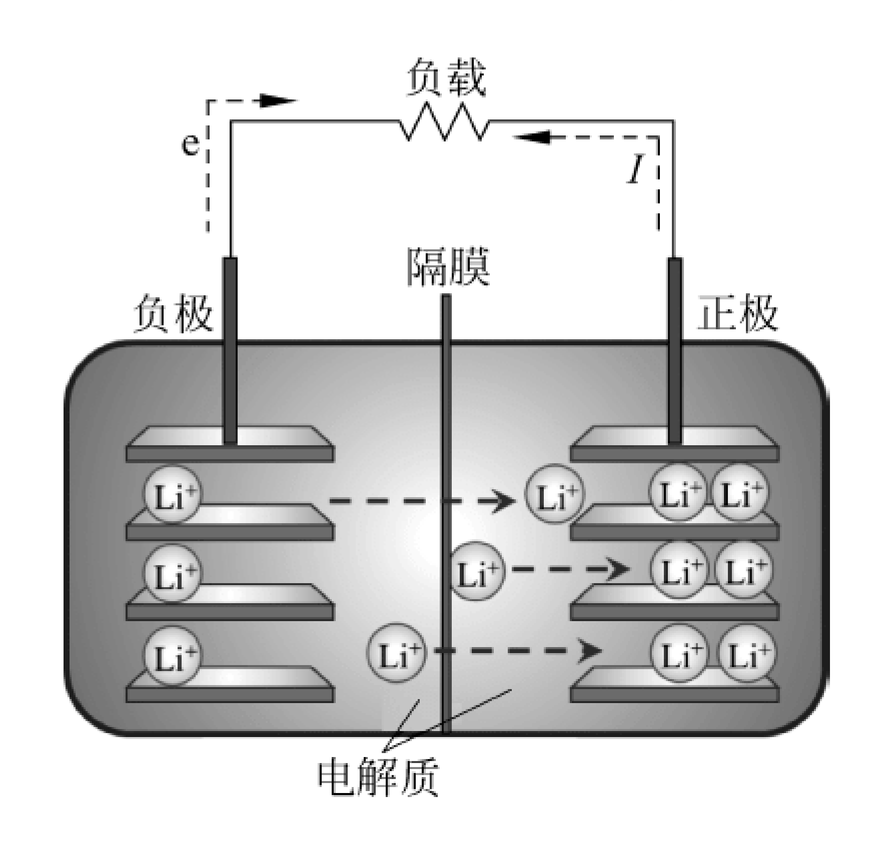


图 10-1　锂离子电池基本结构

10.1.2　锂离子电池的工作原理

在电池的充放电过程中,电池的反应方程式如下:

正极反应:$LiMO_2 \underset{放电}{\overset{充电}{\rightleftharpoons}} Li_{1-x}MO_2 + xLi^+ + xe^-$

负极反应:$nC + xLi^+ + xe^- \underset{放电}{\overset{充电}{\rightleftharpoons}} Li_xC_n$

电池反应通式:$LiMO_2 + nC \underset{放电}{\overset{充电}{\rightleftharpoons}} Li_{1-x}MO_2 + Li_xC_n$

式中:M 表示 Co、Mn、Ni 等元素。x 为参与反应的锂离子或电子分数;n 为负极参与反应的分子或原子数,石墨负极 n 为 6。

从反应方程式可以看出,当电池充电时,Li^+ 从电池正极脱出,经过电解质到达负极并嵌入负极材料中;电池放电时,Li^+ 从电池负极脱出,经过电解质到达正极并嵌入正极材料中。电池的充放电过程实际是 Li^+ 在电池的正负极上嵌入、脱出,并在正负极之间来回移动的过程,因此,锂离子电池也被形象地称为"摇椅电池"。

10.2　主要性能参数

锂离子电池的主要性能参数包括:

1. 开路电压和工作电压

电池的开路电压可以简写为 OCV(open circuit voltage),它是蓄电池在开路情况下的端电压,指电池在断电状态下进行充分静置,达到稳定后,正负极之间的电势差。

电池的工作电压是指电池在工作状态下，即有电流流过时电池正负极之间的电势差。在电池放电状态下，由于电池内阻的作用，工作电压总是低于开路电压；在充电状态下则刚好与之相反，工作电压总是高于开路电压。

2. 电池的内阻

电池的内阻是电池中电解质、正负极群、隔板等电阻的总和。它是衡量电池性能的重要参数，电池内阻大，会增加电池内部的能量损耗，加剧电池的产热，同时输出能力低。电池的内阻主要受到电池材料、制造工艺、电池结构、温度等因素的影响。

3. 电池的容量

这里介绍容量相关的三个概念：额定容量、标准容量与实际容量。

电池的额定容量，是以制造商规定的条件测得的并由制造商申明的电池单体、模块、电池包或系统的容量值。

电池的标准容量，是指室温下电池充满电后，在规定的环境温度(一般为室温)、标准的放电电流下能够放出的电量，单位 A·h。

电池的实际容量，是指电池在一定的放电条件下所能放出的实际电量。对于某一电池而言，标准容量只与它自身的老化程度有关，而实际容量会受到放电电流以及温度的影响。

4. 电池的能量与比能量

电池的输出能量，是指电池在一定的放电条件下所能够放出的电能。它等于电池放电容量和电池平均工作电压的乘积或等于放电功率的积分，单位 W·h。

电池的比能量可以分为质量比能量和体积比能量。质量比能量是指电池能量与电池质量之比，单位 W·h/kg。体积比能量是电池能量与电池体积之比，单位 W·h/L。

5. 电池的功率与比功率

电池的功率，是指在一定充放电条件下，电池在单位时间内能够接收或输出的能量，单位 W。

电池的比功率可以分为质量比功率和体积比功率。质量比功率是指电池功率与电池质量之比，单位 W/kg。体积比功率是指电池功率与电池体积之比，单位 W/L。

6. 充放电倍率

充放电电流的大小常用充放电倍率来表示。充放电倍率实际上是充放电电流与额定容量的比值。例如，额定容量为 20 A·h 的电池用 40 A 放电时，其放电倍率为 2 C，用 10 A 充电时，充电倍率为 0.5 C。同时，充放电倍率也是电池充放电快慢的一种量度，可以用来表示电池在规定的时间内放出额定容量时所需的电流值。例如，电池的额定容量用 1 h 放电完毕，称为 1 C 放电；5 h 放电完毕，则称为 1/5=0.2 C 放电。

7. 电池的荷电状态

电池的荷电状态可以简写为 SOC(state of charge)，一般可以定义为电池的剩余电量与标准容量的比值。电池的荷电状态一般用百分数来表示，其取值范围为 0～100%。当 SOC=

0 时,表示电池电量完全放尽,当 SOC=100%时,表示电池电量完全充满。

8. 放电深度

电池的放电深度可以简写为 DOD(depth of discharge),是指电池放出的电量占标准容量的百分比。电池的放电深度是影响电池寿命的重要参数之一。

9. 循环寿命

循环寿命是指在一定的环境条件下,按一定的充放电规程进行充电与放电(每个充放电周期称 1 个循环),直至电池容量衰减或内阻增加一定比例(一般能量型电池容量衰减 20%,功率型电池内阻增加 1 倍,定义为寿命终点)所经历的循环数,单位为次。国家标准 GB/T 31484—2015 中定义了标准循环寿命和工况循环寿命。

10. 日历寿命

日历寿命是指在一定环境条件下(如温度、SOC),电池搁置直至电池容量衰减或内阻增加一定比例(定义为寿命终点)所经历的时间,单位一般为年。

11. 库仑效率

库仑效率是放电时从蓄电池中释放的电量除以恢复到初始容量所需的电量的百分比,是表征电池充放电可逆性的重要参数,也是决定电池寿命的参数之一。

12. 自放电率

电池的自放电是蓄电池内部自发的或不期望的化学反应造成可用容量自动减少的现象。自放电率是指单位时间内电量降低的百分数,用于表征电池的荷电保持能力,主要受到电池的制造工艺、电池材料、储存条件等因素的影响。

以上是锂离子电池的一些常用性能参数。相比铅酸电池、镍氢电池等其他类型的二次电池,锂离子电池具有能量密度高、自放电率低、寿命长等优点。三类电池的性能比较如表 10-1 所示。

表 10-1　三类电池性能比较

参数名称	铅酸电池参数	镍氢电池参数	锂离子电池参数
常见工作电压/V	2	1.2	3.2～3.7
质量比能量/(W·h/kg)	30～50	60～90	70～300
循环寿命(100%DOD)	≥300 次	≥400 次	≥600 次
放电率/(%/月)	6～8	20～35	<5
快速充电能力	一般	较好	好
耐过充能力	一般	强	差
记忆效应	无(但是有硫酸盐化)	有(OCV 有滞回)	无(OCV 滞回小,LFP 稍大)
环境污染	严重	微小	微小
使用温度范围/℃	−20～50	−20～50	−20～55
价格/(元/(W·h))	<1	2～7	1.5～7

10.3 锂离子电池试验平台

锂离子电池试验平台最基本的设备一般包含充放电测试仪(台)、模拟环境的可编程高低温箱(仓)、加速量热仪等设备。

10.3.1 充放电测试仪

在锂离子电池的相关测试中都需要对电池进行充放电处理,电池充放电测试仪是检测电池的充放电性能、电池容量以及电池充放电安全的核心设备。图 10-2 所示为某一款充放电测试仪,其测试量程为 30 V 10 A,具有 8 个测试通道。

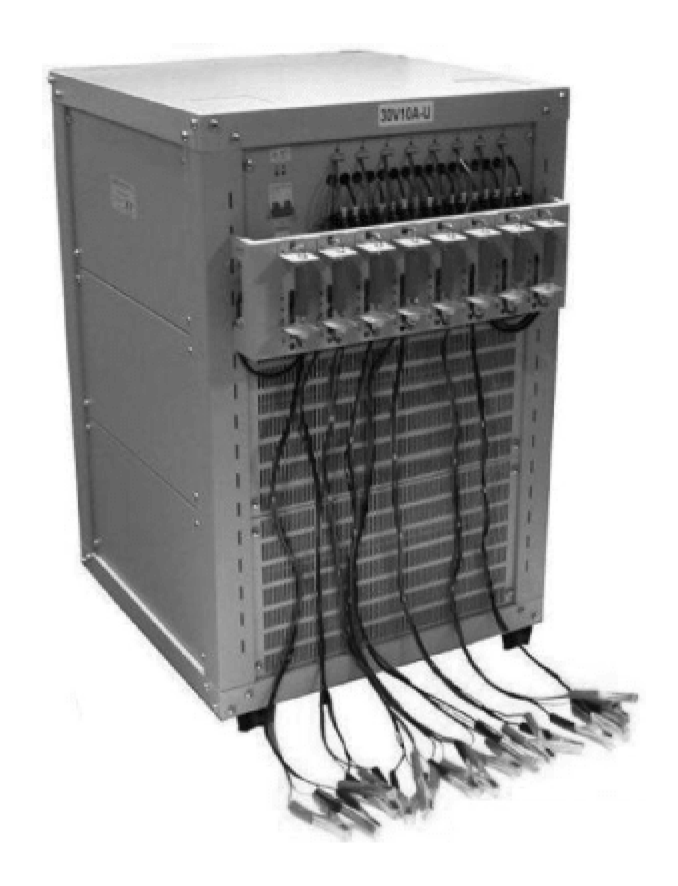


图 10-2 充放电测试仪

充放电测试仪(台)主要功能如下:

(1) 具有恒流恒压充放电以及工况模拟功能。用户可以根据需求进行充放电编程。

(2) 具有多通道充放电功能。一般来说单体电池充放电测试仪具有多个测试通道,可以同时进行多个电池的充放电试验。

(3) 具有在线监测功能和快速容量分析功能。实时在线监测、显示所有测试数据。如电流、电池组电压、单体电池电压、放电时间、容量。

(4) 具备多项警报功能,能适时发出警报,风扇故障报警并停止放电。

(5) 具备多项安全自动保护功能,短路、过流、温度过高等自动保护功能。

10.3.2 可编程式高低温箱(仓)

温度对于锂离子电池的性能有很大的影响,为了进行不同温度下的电池性能测试,需要电池处于恒定的温度环境中。电池测试一般在可编程式高低温箱中进行,如图 10-3 所示为某款温箱,设备上方的箱体是用来放置电池的测试箱体,设备下方一般布置制冷压缩机和风扇。



图 10-3 可编程式高低温箱

可编程式高低温箱主要功能如下:

(1) 具有自动温度控制功能。可以根据试验需求,提前设定不同时刻的温箱温度。当温箱达到设定时刻后,会根据设定参数调整温箱的温度。

(2) 具有精确的温度控制功能。温度调整稳定后,温度的上下波动小于 0.5℃,且温箱的工作空间内任一点的最高

和最低温度之差一般要求低于±2℃。

(3) 具有抗干扰能力。温箱能够适应外界环境的变化,从而保证设备稳定的工作。

(4) 具备多项警报功能,一般设备监控系统中均安装显示故障信号,能及时切断高低温箱的电源,且进行报警。

10.3.3 绝热加速量热仪

绝热加速量热仪(accelerating rate calorimetry,ARC)是进行电池热特性测试的主要实验仪器之一。绝热加速量热仪的主要工作原理是通过对仪器的控制,使得样品温度与量热腔温度始终保持一致,从而提供绝热环境。

ARC 工作原理:由于电池及其材料在高温情况下才会出现自产热的情况,在 ARC 实验过程中,需要首先加热电池或材料样品,直至检测到样品自产热之后,再进入绝热跟踪阶段,保持绝热测试环境。ARC 的一个典型的工作模式为“heat-wait-seek”,即“加热-等待-搜寻”,如图 10-4 所示。加热过程中,从当前温度开始,设定一个更高的加热温度 T_{arget}(T_{arget}一般比当前温度高 5℃),温度将会以台阶状上升。每个台阶加热完成后,进行一段时间的等待(wait),以保证样品达到热平衡。然后进入搜寻(seek)阶段,ARC 根据样品表面温度 T_S 及其变化率 dT_S/dt,判定样品是否开始自产热。如果 ARC 判定样品开始自产热,即检测到样品的自升温速率大于 ARC 设定的检测灵敏度(sensitivity)时,如 0.01℃/min,ARC 将会跟踪样品的温度,进入“绝热(exotherm)”阶段。在“绝热”阶段,ARC 控制加热器加热,使得

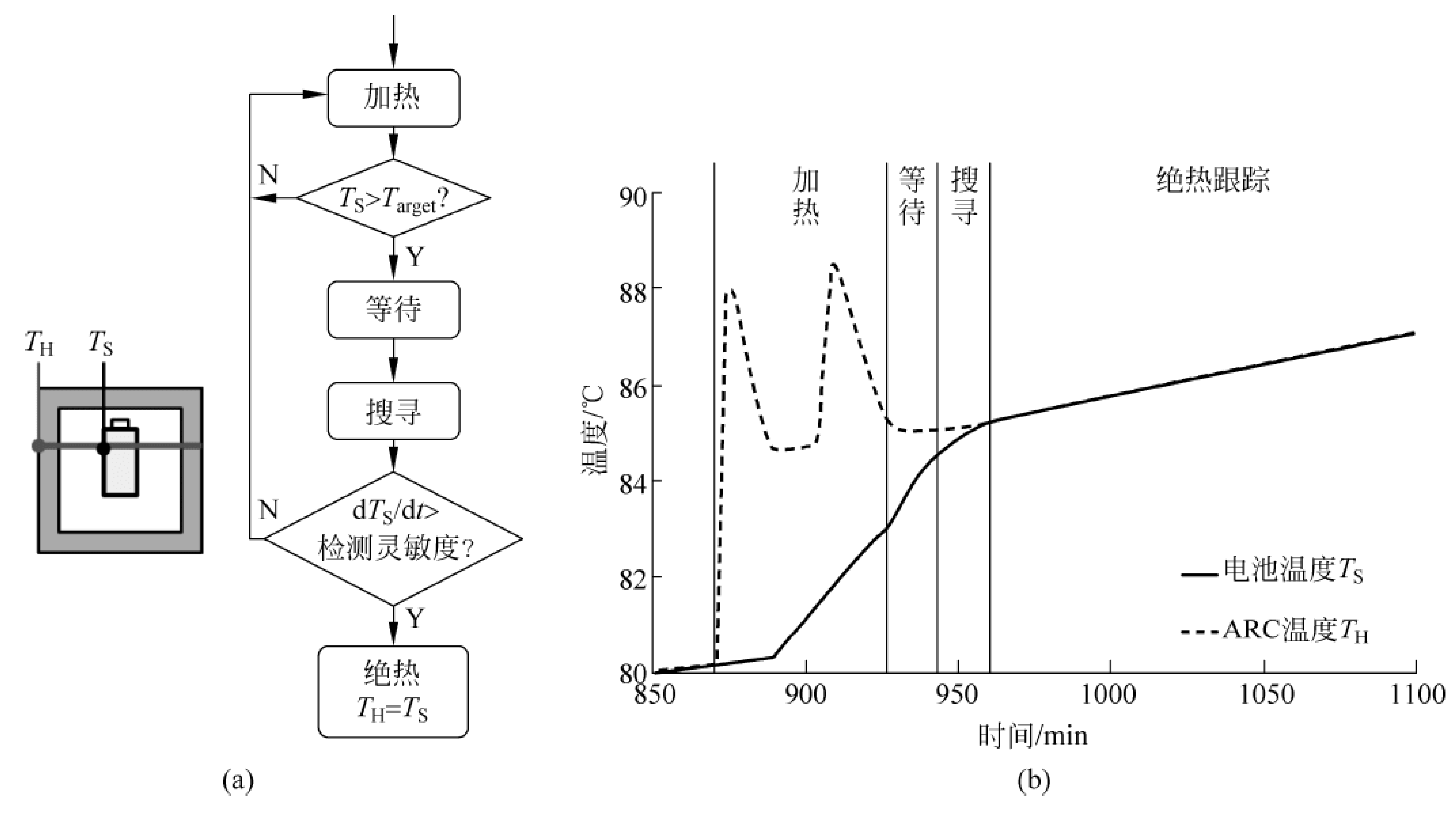


图 10-4 ARC 的工作原理

(a) ARC 的实验流程图;(b) 一个典型的 ARC 测试曲线

环境温度 T_H 总是等于样品表面温度 T_S（$T_H=T_S$）。于是，样品与外界不存在换热，即进入了绝热测试环境。在绝热测试环境下，电池产生的热量完全被电池吸收并造成 ΔT 的温升。在电池或材料的热容 MC_p 已知的情况下，就可以准确获得绝热环境下的产热量 $\Delta H=MC_p\Delta T$，这个产热量 ΔH 是不受散热条件影响的。对应不同温度下的升温速率可以通过求取温度曲线的斜率获得。

传统的 ARC、示差扫描量热仪（differential scanning calorimeter，DSC）的量热腔容积较小，研究人员一般只能测定纽扣电池、18650（一种圆柱形电池型号，直径为 18 mm，高为 65 mm）小型电池的热失控特性。而对研究对象为大容量锂离子动力电池而言，应使用具有大容积量热腔的量热仪器进行量热测试。但是，量热腔容积变大后，量热仪的测试精度会大大下降。目前，英国 THT 公司掌握了较为成熟的大型动力电池绝热量热技术。THT 公司生产的大型加速绝热量热仪，又称为 EV-ARC（extended volume-accelerating rate calorimetry），具有与传统小容积的 ARC 相同的绝热测试功能。特别的是，EV-ARC 具有大型量热腔，圆柱体量热腔直径达到 25 cm，深度达到 50 cm，可以测试大容量动力电池的热特性，如图 10-5 所示。较小的量热腔对应传统的 ARC（产品说明中称为 Standard ARC），较大的量热腔即对应 EV-ARC。



图 10-5 包含 EV-ARC 在内的 THT 加速绝热量热仪

10.4 锂离子电池主要测试内容

锂离子电池测试的对象为电池单体、模组和电池系统。本节只介绍电池管理开发中常用的电池测试内容，含电池单体和电池模块或包的测试。电池单体的测试内容包括电池的基本性能测试（容量测试、内阻测试、开路电压测试）、耐久性测试以及热特性测试（电池比热容测试、有效熵电势测定、热失控测试）。电池模块或包的试验内容主要为基本性能测试（容量测试、内阻测试）。电池系统相关测试可以参考国家相关推荐标准，如 GB/T 31467.1—2015、GB/T 31467.2—2015 和 GB/T 31484—2015。

10.4.1　术语和定义

（1）电池单体：将化学能与电能进行相互转换的基本单元装置，通常包括电极、隔膜、电解质、外壳和端子，并被设计成可充电。

（2）电池模块：将一个以上单体电池按照串联、并联或串并联方式组合，且只有一对正负极输出端子，并作为电源使用的组合体。

（3）电池包：通常包括电池单体、电池管理模块（不含 BCU（battery control unit））、电池箱及相应附件（冷却部件、连接线缆等），具有从外部获得电能并可对外输出电能的单元。

（4）电池系统：一个或一个以上电池包及相应附件（管理系统、高压电路、低压电路、热管理设备以及机械总成等）构成的能量存储装置。

（5）截止电压：指充电过程的最高电压或者放电过程的最低电压。

（6）恒流充电/放电过程：指以恒定的电流给电池充电/放电。

（7）恒压充电/放电过程：指以恒定的电压给电池充电/放电（为保持电压恒定，恒压过程中电池的电流绝对值会降低）。

（8）环境温度：环境指电池周围存在的、温度恒定的空间。在测试中以可编程式高低温箱的恒温控制来保证环境温度的恒定。

（9）标准循环：电池厂商规定的标准容量测试的循环充放电方法，通常在室温（25℃）下进行。

（10）电池极化：电池电极上无外电流通过时对应的电势是平衡电势。当有电流通过电极时，电极电势将偏离平衡值，这种偏离平衡的现象称为电极的极化。电池的极化可以分为电化学极化、欧姆极化和浓差极化三类。

（11）电池内阻：电池内阻是指电池在工作时，电流流过电池内部所受到的阻力，包括欧姆内阻、电化学极化内阻和离子迁移内阻等，三者之和称为电池的总内阻。在常见的表达习惯中，极化内阻指电化学极化内阻与离子迁移内阻之和，电池的总内阻由欧姆内阻和极化内阻两类组成。

10.4.2　锂离子单体电池基本性能试验

通过基本性能试验，可以获得不同工作条件下，电池的容量、内阻及开路电压等参数，为电池评价和建模提供数据。

1. 试验内容

锂离子单体电池基本性能试验主要包含以下几个方面内容。

1）容量测试

容量是锂离子电池最重要的参数之一，反映电池承载电荷的能力，分为充电容量和放电容量。锂离子电池的容量受充放电方法、环境温度、倍率等因素的影响。在基本性能测试中，通常测试电池的放电/充电容量随环境温度、倍率的变化关系，此时需保证电池的充电/

放电条件一致，即在相同的环境温度和充电/放电方法下进行充电，再观察不同条件下放电/充电容量的差别。

2）内阻测试

测量电池内阻的方法主要有三种，分别为交流阻抗频谱法、断电法和阶跃法。断电法和阶跃法利用电流突变时，欧姆内阻与其他极化现象响应时间的不同，进行不同内阻的辨识：电流输入瞬间变化时，欧姆内阻引起的电压降瞬间发生变化，随后，其他极化以近似指数的规律完成瞬态过程，直至电压恢复到稳态电压值。交流阻抗频谱法向电池输入不同频率的交流信号，通过分析电池电压输出的响应，得到电压的稳态和瞬态特性。本章中采用阶跃法测量不同 SOC 对应的电池直流充放电欧姆内阻和总内阻，阶跃法也称为 HPPC（hybrid pulse power characterization）测试法。

3）开路电压测试

电池的开路电压（OCV）是指电池断电后电压达到的稳定值。对于充电过程的电池，断电后电压将逐步下降至稳定值；对于放电过程的电池，断电后电压将逐步上升到稳定值。电池的开路电压随 SOC 变化，开路电压表征了电池在某一荷电状态 SOC 下所对应的稳定电动势，开路电压测试的内容即是测量电池 OCV-SOC 曲线。OCV-SOC 曲线的测试方法主要有插值法和静置法两种。

2. 试验方法

本节介绍容量测试、内阻测试和开路电压测试的试验方法，试验对象以三元锂离子电池单体（电池容量为 37 A·h）为例。所有测试均需要在恒温间或恒温箱内进行，以保证稳定的环境温度。

1）容量测试

容量测试的内容为测试电池单体在不同温度、不同倍率下的放电容量，获得电池放电容量随温度、倍率的变化关系。

测试中，温度点、倍率点的选取范围需要覆盖电池的工作温度和工作倍率区间。示例中试验参数点选取参见表 10-2。

表 10-2　容量测试的试验点选取

倍率	温　　度			
	－25℃	0℃	25℃	55℃
1/3 C	√	√	√	√
1 C	√	√	√	√
3 C	√	√	√	√

测试过程中需要保证除温度、倍率外的其他实验条件完全一致，包括电池的充电方法和放电截止电压。根据试验用 37 A·h 三元锂离子电池说明书，该电池的标准充电模式为：25℃下，以 1 C 倍率（37 A）恒流充电至 4.2 V，再以 4.2 V 恒压充电直至电流达到截止电流

1.85 A。电池的充电截止电压为 4.2 V，放电截止电压为 2.8 V。

测试的具体步骤见表 10-3。

表 10-3　容量测试试验步骤

步骤	操　　作
1. 静置	温箱调至 25℃，静置 3 h 至电池温度平衡
2. 充电	以 1 C 倍率(37 A)恒流充电至充电截止电压(4.2 V)，再以充电截止电压(4.2 V)恒压充电至充电截止电流 1/20 C(1.85 A)(如果无厂商资料，一般以 1/20 C 为截止电流)
3. 静置	温箱调至－25℃，静置 5 h 至电池温度平衡
4. 放电	以 1/3 C 倍率恒流放电至放电截止电压(2.8 V)
5. 循环	改变 4 中的放电倍率为 1 C、3 C，重复步骤 1～4
6. 循环	改变 3 中的温箱温度为 0℃、25℃、55℃，重复步骤 1～5

根据试验测试结果，可以得到电池放电容量随温度、倍率变化曲线。图 10-6(a)所示为在不同温度下，电池的放电容量随倍率的变化曲线。可以看出在 0℃及以上温度，电池的放电容量随倍率增加而减少，这是大倍率下电池极化增强，放电时提前达到截止电压导致。但－25℃下，放电容量在 3 C 处有显著增加，是由于 3 C 倍率放电时电池温升较大造成的。

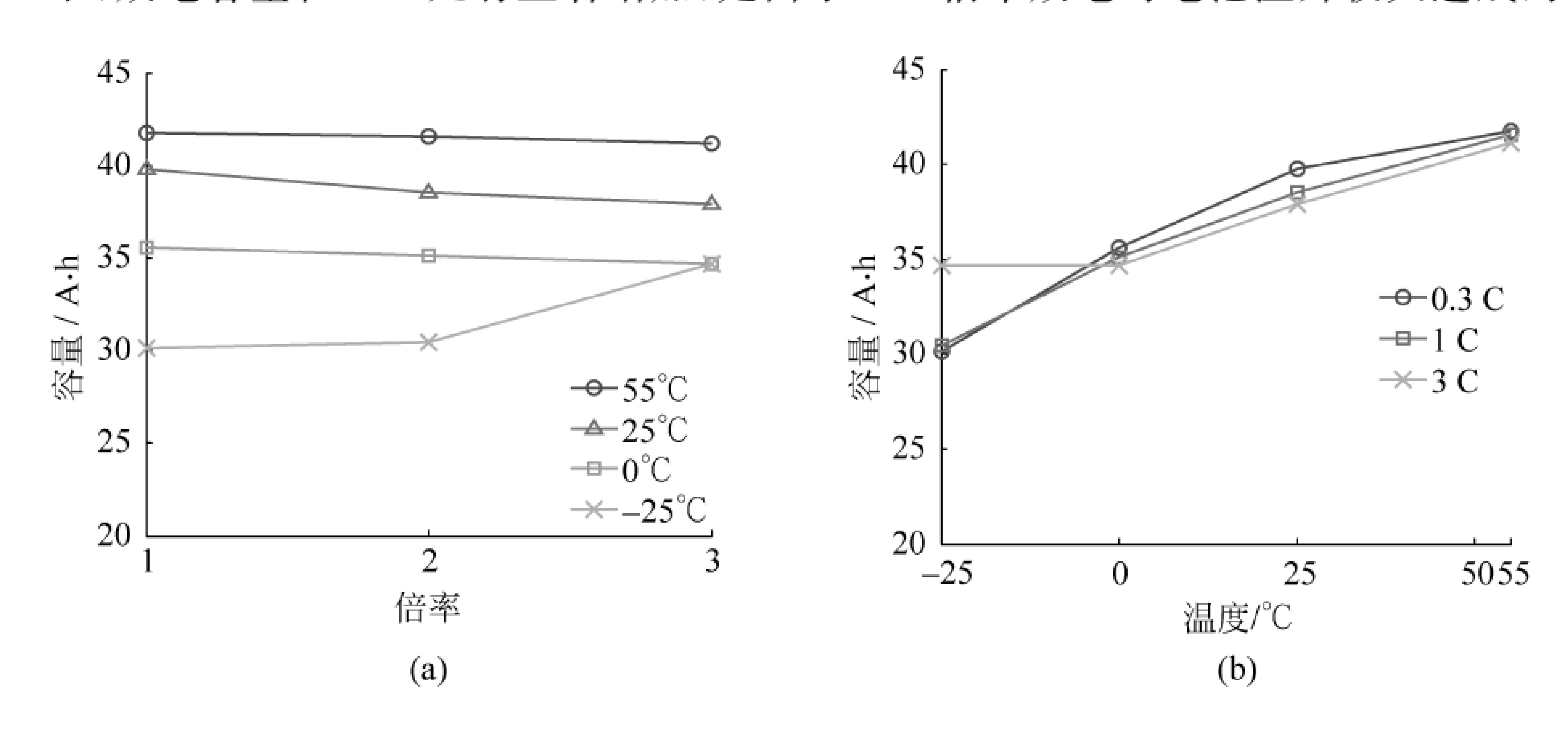


图 10-6　放电容量测试结果

(a) 不同倍率放电容量对比；(b) 不同温度放电容量对比

图 10-6(b)为在不同倍率下，电池的放电容量随温度的变化曲线。可以看出一般情况下温度升高，电池的放电容量增加。在大倍率和低温条件下，由于温升明显，放电容量随温度的变化规律可能略有区别。图 10-7 为试验电池在－25℃、不同倍率放电的电压与温度曲线，3 C 条件下电池的温升非常明显。

2) 内阻测试

本节采用阶跃法(也称作 HPPC 方法)测量不同温度下、不同 SOC 对应的电池直流充放电欧姆内阻和总内阻，试验方法的设计主要参考了《FreedomCAR 电池试验手册》。欧姆

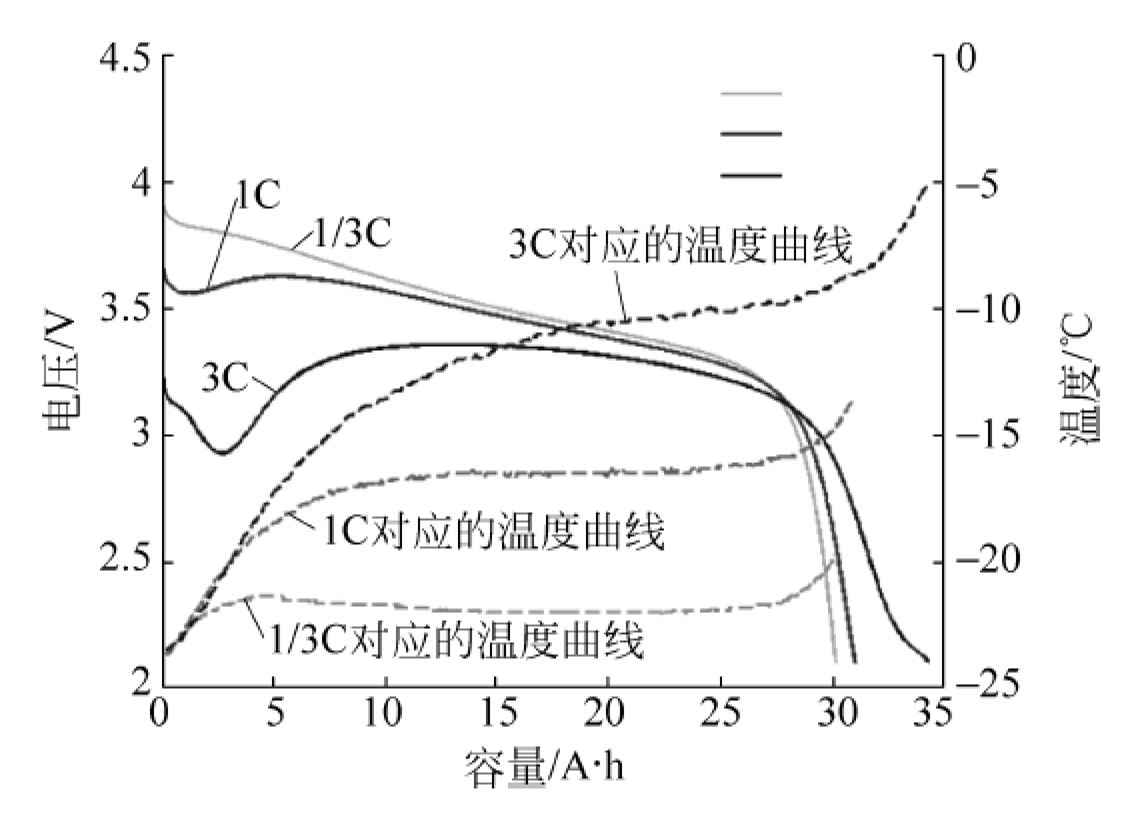


图 10-7 低温(－25℃)下,不同倍率放电电压与温度曲线

内阻与电流无关,会使电压在施加电流后的短时间内发生改变;电池极化内阻与电流大小相关,会随电流值的增大而改变并最终达到平衡。实验仪器的采样频率为 1 Hz,由此可以在实验中向电池输入阶跃电流信号,使用 1 s 内的电压变化值比 1 s 内的电流变化值来获得短时间响应的内阻(本文近似看作欧姆内阻),用 30 s 内的电压变化值比电流变化值获得近似总内阻。试验原理如图 10-8 所示。

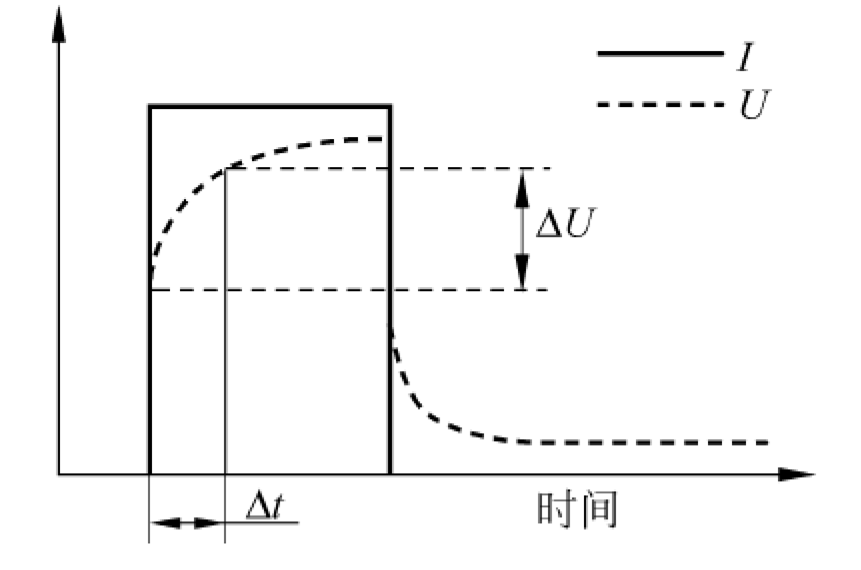


图 10-8 阶跃法电阻测试原理

当 $\Delta t=1$ s 时,可近似得到电池的欧姆内阻:$R_{\mathrm{Ohm}}=\dfrac{\Delta U_{1\mathrm{s}}}{\mathrm{I}}$;

当 $\Delta t=30$ s 时,可近似得到电池的总内阻:$R_{\mathrm{total}}=\dfrac{\Delta U_{30\mathrm{s}}}{\mathrm{I}}$;

当电流为正时(充电)得到电池的充电内阻,电流为负时(放电)得到电池的放电内阻。在不同 SOC 处,电池的内阻不同。

测量电池在－25℃、－10℃、0℃、10℃、25℃、40℃下,电池在不同 SOC 处的内阻,试验的具体步骤如表 10-4 所示。

表 10-4 阶跃法测量电池内阻的具体试验步骤

步骤	操 作
1. 静置	温箱调至 25℃,静置 3 h 至电池温度平衡
2. 充电	以 1 C 倍率(37 A)恒流充电至充电截止电压(4.2 V),再以充电截止电压(4.2 V)恒压充电至充电截止电流 1/20C(1.85 A)
3. 静置	温箱调至－25℃,静置 5 h 至电池温度平衡
4. 电流脉冲*	以 1 C 恒流放电 30 s,静置 40 s,1 C 恒流充电 30 s
5. 调整 SOC	以 1 C 倍率放电,调整至下一 SOC 点(如以 5%SOC 为间隔,则调整 SOC 至 95%),静置 3～5 h

续表

步骤	操　　作
6. 循环	重复步骤 4～5,至 SOC 为 0%
7. 电流脉冲*	以 1 C 恒流放电 30 s,静置 40 s,1 C 恒流充电 30 s
8. 静置	静置 1 h
9. 循环	改变布置 3 中的温箱温度为 0℃、−10℃、25℃、10℃、40℃,重复步骤 1～8

* 表示上限电压为 4.2 V,下限电压为 2.8 V。如果电压超限,自动跳转下一步。

HPPC 测试步骤的示意图参见图 10-9。

根据测试结果,可以得到电池在不同温度和不同 SOC 下的充电/放电内阻。不同温度下,电池放电欧姆内阻(以 1 s 为时间间隔计算的内阻)随 SOC 的变化曲线见图 10-10,从上至下依次为 −25℃ 到 40℃ 的内阻曲线。可以看出,随着温度降低,电池内阻逐渐升高,尤其在 0℃以下时,变化更为显著。

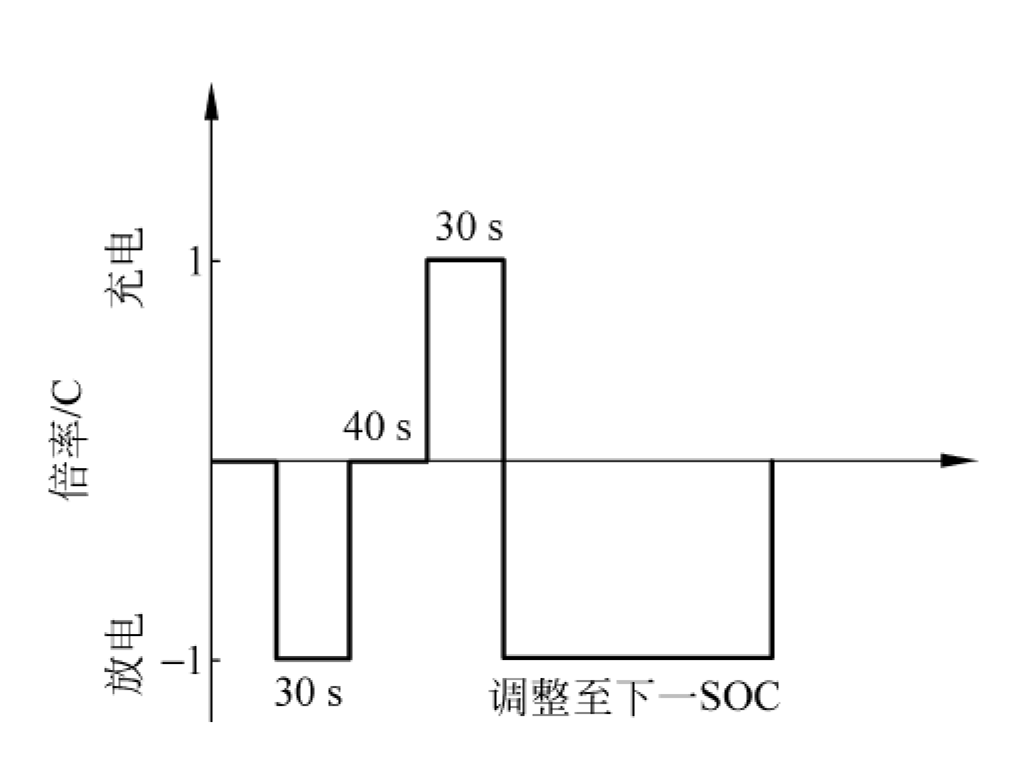


图 10-9　HPPC 测试步骤示意图

3) 开路电压(OCV)测试

OCV-SOC 曲线的测试方法主要有插值法和静置法两种。测试目的为获得电池的开路电压与 SOC 关系曲线。在不同温度下,电池开路电压与 SOC 关系曲线基本不变。但电池放电和充电达到相同 SOC 时,静置获得的开路电压可能会有差异,称为电池的开路电压滞回现象。对于磷酸铁锂电池,滞回现象较为明显,对于三元锂电池,充放电开路电压曲线的差别较小。本节给出三元锂电池充放电开路电压随 SOC 变化关系曲线的测试方法。

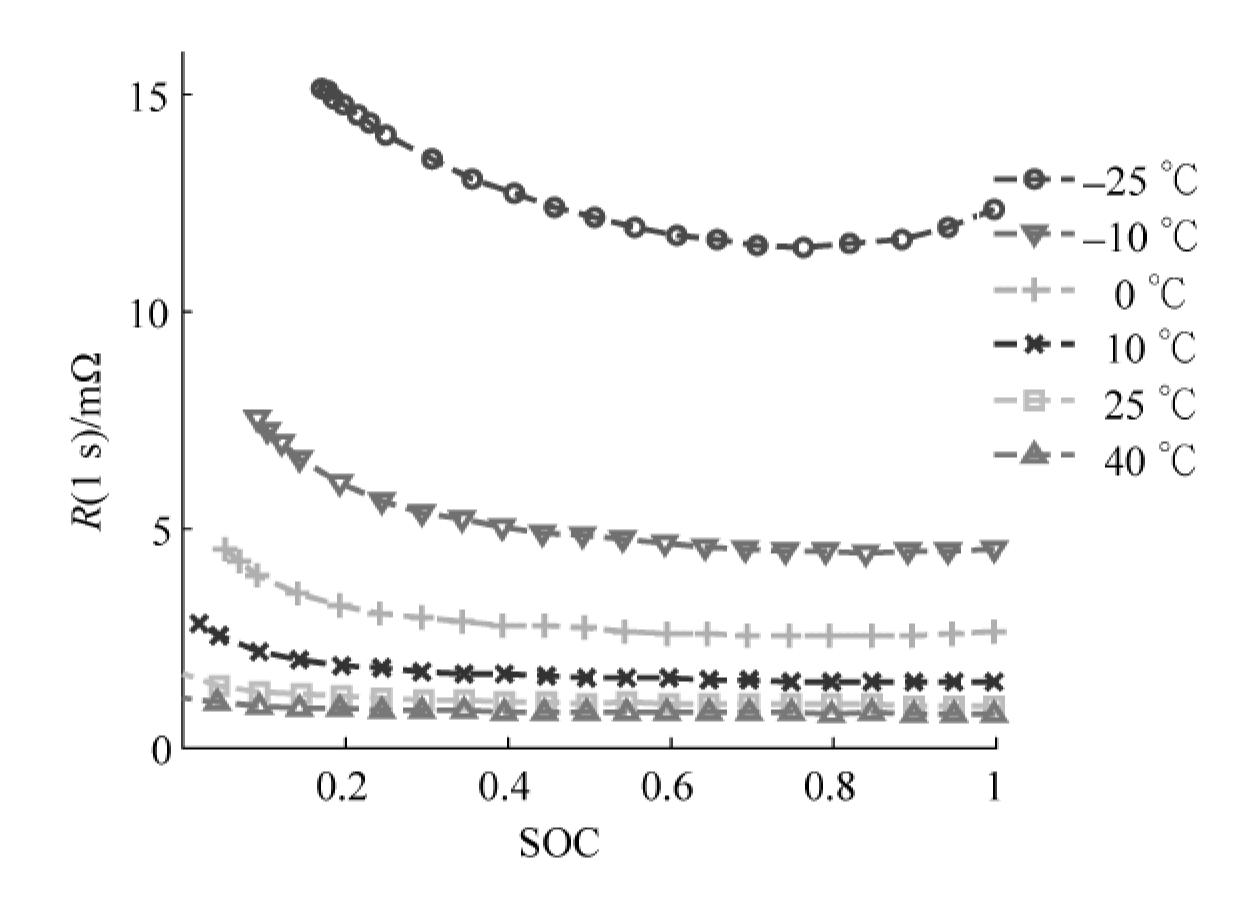


图 10-10　不同温度下电池内阻随 SOC 变化曲线

首先对插值法进行介绍。插值法将电池用相等的小倍率电流充电和放电，则电池的OCV曲线近似为充电与放电电压曲线的中值。该方法原理简单，但精度较差，尤其是在SOC的两端区间，两条充放电端电压曲线并不关于OCV曲线完全对称。因此OCV插值方法并不常用。

本节使用静置法对电池的开路电压进行测试。该方法是目前已知的OCV实验方法中精度较高的一种，它通过停止充放电让电池处于足够时间的静置状态而得到稳定、准确的OCV。由于静置时间不同，得到的OCV曲线可能存在差异，一般常温下(大于0℃)选取静置时间为3 h以上，低温下(小于或等于0℃)选取静置时间为5 h以上。

试验具体步骤参考表10-5和表10-6。

表10-5　静置法测量电池充放电开路电压曲线

步骤	操　作
1. 静置	温箱调至25℃，静置3 h至电池温度平衡
2. 充电	以1 C倍率(37 A)恒流充电至充电截止电压(4.2 V)，再以充电截止电压(4.2 V)恒压充电至充电截止电流1/20 C(1.85 A)
3. 静置	静置3～5 h
4. 调整SOC	以1 C倍率放电，调整电池SOC为95%，静置3～5 h
5. 循环	以5%SOC为间隔，重复步骤4，至SOC为0

表10-6　静置法测量电池充电开路电压曲线

步骤	操　作
1. 静置	温箱调至25℃，静置3 h至电池温度平衡
2. 放电	以1/3 C倍率恒流放电至放电截止电压(2.8 V)
3. 静置	静置3～5 h
4. 调整SOC	以1 C倍率充电(电压达到充电截止电压后转恒压充电)，调整电池SOC为5%，静置3～5 h
5. 循环	以5%SOC为间隔，重复步骤4，至SOC为100%

需要说明的是，电池的放电开路电压测试也常与内阻测试结合进行，以HPPC测试表格(表10-4)步骤5中静置获得的电压作为电池的开路电压。

25℃下电池的开路电压滞回曲线如图10-11所示，可以看出试验使用的37 A·h三元锂单体充放电开路电压有滞回现象，但不显著。

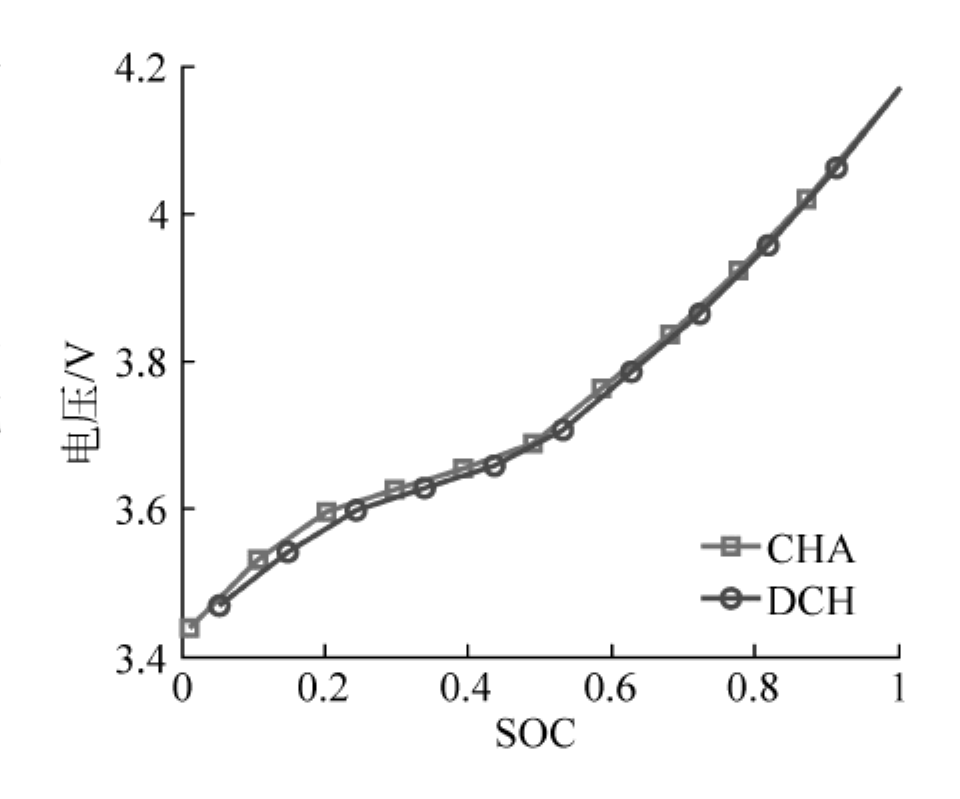


图10-11　25℃下开路电压滞回曲线

10.4.3　锂离子电池模块或包的基本性能测试

电池模块或包的基本性能的测试目的主要是

用于评价电池一致性，为电池管理中的状态估计、均衡算法等提供支持。

1. 电池模块或包的容量测试

模组或包的容量测试步骤如表 10-7 所示。

表 10-7　模块或包容量测试试验步骤

步骤	操　　作
1. 准备	将多通道采集设备(也可以是电池管理 BMS)的电压传感器连接到模块或包的各个单体极柱上，将温度传感器适当布置在模块或包的电池表面上(采用硅胶和胶带固定)。调节采集设备与充放电仪的通信，保证充放电仪能够正确收到模块中每个单体的电压及温度
2. 静置	将电池模组或包放置于温箱中调至 25℃，静置 3 h 至电池模组或电池包温度平衡
3. 充电	以 1 C 倍率恒流充电至最高单体充电截止电压(4.2 V)，搁置 10 s，再以 1/20 C 充电至最高单体电压达到充电截止电压(4.2 V)。
4. 静置	温箱调至测试温度(用户关心的温度)，静置 5 h 至电池模组或电池包温度平衡
5. 放电	以 1/3 C 倍率恒流放电至最低单体电压达到放电截止电压(2.8 V)
6. 循环	改变步骤 5 中的放电倍率为 1 C、3 C，重复步骤 2～5

2. 电池模块或包的内阻测试

电池模块或包的内阻测试也采用与单体电池一样的阶跃法(也称作 HPPC 方法)测量，只是不用考虑太多的温度，一般只是考虑室温情况，其过程如表 10-8 所示。

表 10-8　阶跃法测量电池模块或包内阻的具体试验步骤

步骤	操　　作
1. 准备	将多通道采集设备(也可以是电池管理 BMS)的电压传感器连接到模块或包的各个单体极柱上，将温度传感器适当布置在模块或包的电池表面上(采用硅胶和胶带固定)。调节采集设备与充放电仪的通信，保证充放电仪能够正确收到模块中每个单体的电压及温度
2. 静置	温箱调至 25℃，静置 3 h 至电池模组或电池包温度平衡
3. 充电	以 1 C 倍率恒流充电至最高单体充电截止电压(4.2 V)，搁置 10 s，再以 1/20 C 充电至最高单体电压达到充电截止电压(4.2 V)
4. 静置	温箱调至测试温度，静置 5 h 至电池模组或电池包温度平衡
5. 电流脉冲*	以 1 C 恒流放电 30 s，静置 40 s，1 C 恒流充电 30 s
6. 调整 SOC	以 1 C 倍率放电，调整至下一 SOC 点(如以 5%SOC 为间隔，则调整 SOC 至 95%)，静置 3～5 h
7. 循环	重复步骤 4—5，至 SOC 为 0
8. 电流脉冲*	以 1 C 恒流放电 30 s，静置 40 s，1 C 恒流充电 30 s
9. 静置	静置 1 h

* 表示单体最高上限电压 4.2 V，单体最低下限电压为 2.8 V。如果电压超限，自动跳转下一步。

10.4.4 锂离子电池耐久性测试

1. 试验内容

电池的耐久性可以由电池寿命进行表征，在相同的运行工况下，电池寿命越长，电池的耐久性就越好。电池寿命包括日历寿命与循环寿命，日历寿命指电池在静置储存状态下的寿命，循环寿命指电池在不同工况循环作用下的寿命。一般而言，研究日历寿命需要的时间较长，本书主要介绍不同影响因素下的电池循环寿命测试方法。

表征电池寿命的参数较多，其中，电池的标准容量衰减率及电池内阻的变化率最为常用。一般能量型电池以电池的标准容量衰减为初始值的 80%，功率型电池以内阻增长为初始值的 2 倍，作为电池寿命终结的标志。

影响电池耐久性的因素很多，以温度和倍率的作用最为显著，本节主要考虑以下两个因素的作用：环境温度与放电倍率。

2. 试验方法

寿命试验的常用方法为，选择一定数量的电池样品置于不同应力水平（温度、SOC、倍率）下测试，观察所有样品的寿命情况。寿命测试包括日历寿命测试、循环寿命（含恒电流循环、工况循环）测试等。日历寿命测试试验点可以参考表 10-9，循环寿命测试中选取的试验点可以参考表 10-10，工况循环寿命测试工况请参考国家标准 GB/T 31484—2015，每个试验点需要测试至少两个样品。

表 10-9 日历寿命测试试验点

SOC \ 温度	−25℃	0℃	25℃	55℃
25%	√	√	√	√
50%	√	√	√	√
75%	√	√	√	√
100%	√	√	√	√

表 10-10 循环寿命测试试验点

电流倍率(I_1) \ 温度	−25℃	0℃	25℃	55℃
1/3 C	√	√	√	√
1 C	√	√	√	√
3 C	√	√	√	√

日历寿命测试试验步骤如表 10-11 所示，为了获得电池标准容量及内阻衰减与搁置时间的关系，每隔一段时间需要将环境温度调整至 25℃，对电池进行标准容量测试和 HPPC 测试。在 25℃下进行的性能参考测试又称 RPT（reference performance test）测试。

表 10-11　日历寿命测试试验步骤

步骤	操　　作
1. RPT 测试	温箱调至 25℃，静置 3～5 h 以上至电池温度平衡(根据电池初始温度，温度越低静置时间需要越长)； 进行电池标准容量测试和 HPPC 测试
2. 静置	温箱调至 25℃，静置 3 h 至电池温度平衡
3. 充电	以 1 C 倍率恒流充电至截止电压，再以截止电压恒压充电至截止电流 1/20 C
4. 静置	静置 30 min
5. 调整 SOC	以 1 C 倍率放电，调整电池 SOC 至测试的 SOC
6. 搁置	温箱调整至测试温度，搁置 1 周时间(为了缩短 RPT 时间，可根据衰减情况调节，衰减慢可以增加搁置时间)
7. 循环	重复步骤 1～7，直至容量衰减 20%或内阻增加 2 倍

循环寿命试验步骤如表 10-12 示，为了对比电池单体在不同循环次数时的内阻和容量，每隔一定的循环数，需进行一次 RPT 测试。

表 10-12　循环寿命测试步骤

步骤		操　　作	
1. RPT 测试		温箱调至 25℃，静置 3～5 h 以上至电池温度平衡； 进行电池标准容量测试和 HPPC 测试	
2. 调整温度		温箱调至试验点温度，静置 3～5 h(调整目标温度≥0℃，取 3 h。否则取 5 h)	
3. 循环*	恒电流循环	(1)	以 1 C 倍率充电至截止电压，再以截止电压恒压充电至 1/20 C 截止电流
		(2)	搁置 30 min
		(3)	以试验点倍率放电至截止电压
		(4)	搁置 1 h
		(5)	(1)～(4)循环 *n* 次
	工况循环	(1)	以 1 C 倍率充电至截止电压，再以截止电压恒压充电至 1/20 C 截止电流
		(2)	搁置 30 min
		(3)	以指定工况放电至截止电压
		(4)	搁置 1 h
		(5)	(1) ～(4)循环 *n* 次
4. 循环		重复步骤 1～3，至电池容量衰减至初始容量的 80%或内阻增加 2 倍	

* 表示有些电池低温下可能无法进行充电，此时可以不考核低温循环寿命。

寿命测试的图例如图 10-12 所示，图中为磷酸铁锂电池在 45℃、1/3 C 放电倍率下的寿命测试结果。可以看出，电池的容量随循环进行显著下降，但内阻却没有明显增加。

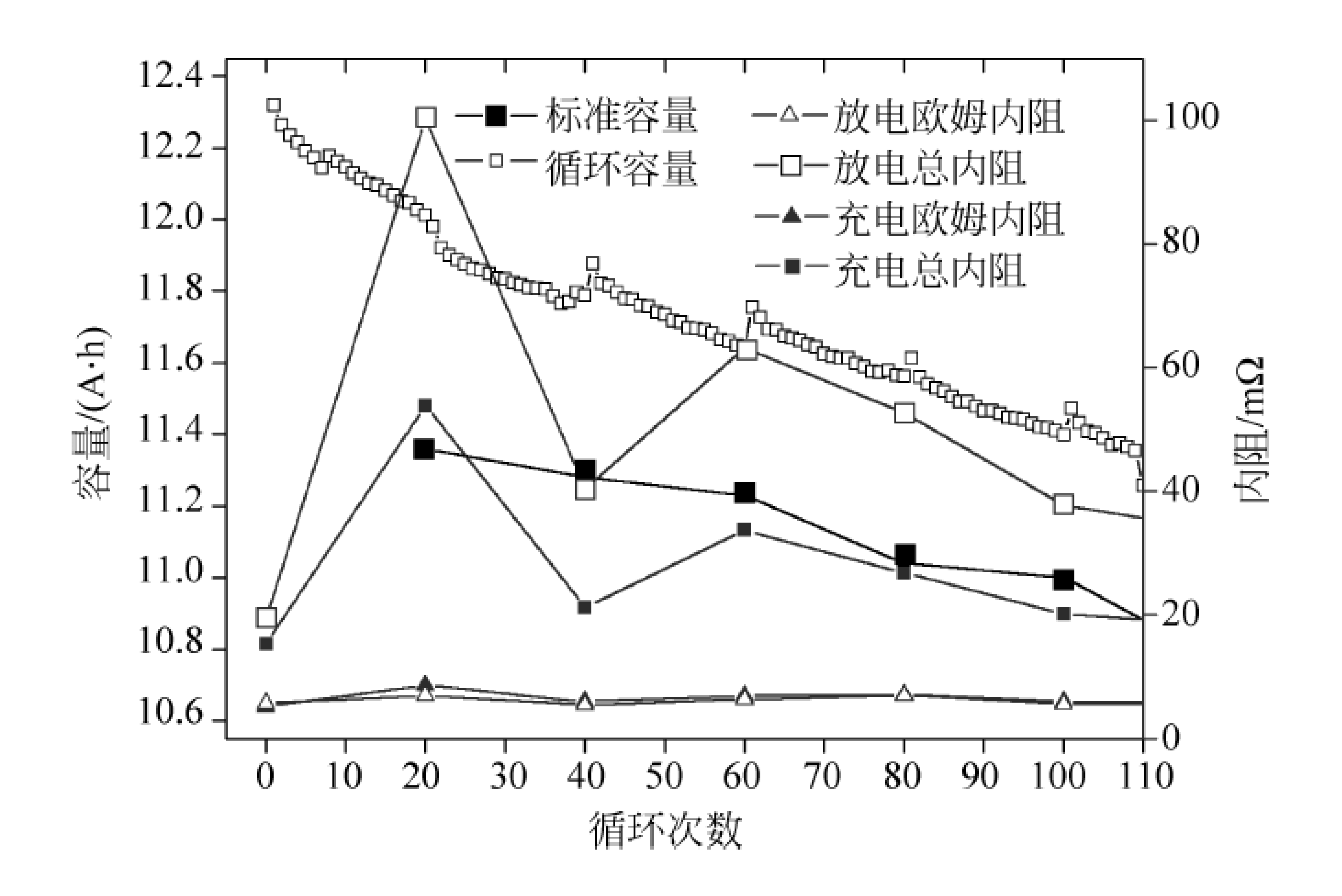


图 10-12 电池寿命测试结果图例

10.4.5 锂离子热特性试验

1. 试验内容

锂离子电池的特性(如内阻)受温度影响很大。而在实际使用过程中,一方面,锂离子电池所处的环境温度受场地、季节以及气候的影响较大;另一方面,在锂离子电池充放电过程中,电池温度也会受到自身产热的影响。为了精确估计电池的状态,需要通过热特性试验获得电池热特性参数,从而建立电池温度预测模型,最终实现电池温度的精确预测。

其中,锂离子电池热特性试验主要包含以下 3 个内容。

(1) 电池比热容测试

电池的比热容是电池重要的热物性参数之一。

(2) 有效熵电势测试

电池产热模型中的反应热取决于工作电流和有效熵电势 U_{EP}(即 $T_{abs}\mathrm{d}U_{OCV}/\mathrm{d}T$,其中,$T_{abs}$指绝对温度;$\mathrm{d}U_{OCV}/\mathrm{d}T$ 为反应热系数),有效熵电势参数受电极材料影响较大,且在很大程度上受 SOC 的影响,为了实现反应热的实时在线估算,需要在线下进行专门的标定测试,获取不同 SOC 下的电池有效熵电势。

(3) 电池热失控特性测试

通过电池热失控特性测试,可以获得评价电池热安全的 3 个特征温度,即副反应自产热起始温度(一般采用 T_1表示)、热失控温度(一般采用 T_2表示)和热失控最高温度(一般采用 T_3表示)。

2. 试验方法

本节介绍电池比热容测试、有效熵电势测试及热失控特性测试的试验方法。

（1）电池比热容测试

比热容测试根据加热量与温升的关系：$Q=cm\Delta T$，在已知加热量并测得温升的情况下，间接计算得到电池比热容 $c=\frac{Q}{m\Delta T}$，其中，Q 为加热量；m 为电池质量；ΔT 为温升。比热容标定试验在加速量热仪中进行，加速量热仪可以保证腔内环境温度与电池温度始终保持一致，避免电池对外散热，模拟绝热环境。

比热容测试的具体步骤见表 10-13。

表 10-13 比热容测试步骤

步骤	操 作
1. 布置加热片	在两块电池单体之间放置矩形电阻加热片，加热片的大小略小于电池单体；加热片与两电池单体紧密接触，并用耐高温胶带固定在一起
2. 布置温度传感器	将电池置于 ARC 中，并在电池表面布置温度传感器
3. 加热	设定 ARC 的 step 为 0 模式（放热模式），起动加速量热仪，并按 hold 保持，开始加热加热片，使电池从 30℃升高到 60℃后停止加热
4. 记录	记录温度、加热功率等试验数据，完成试验

比热容（C_p）测试的参考结果如图 10-13 所示，可以看到在所测温度（T）区间，电池比热容数据在 1000～1300 J/(kg·K)范围内有一定波动。图中同时给出了比热容随温度变化的线性拟合曲线。可以看出，电池的比热容随温度升高而略有增大。

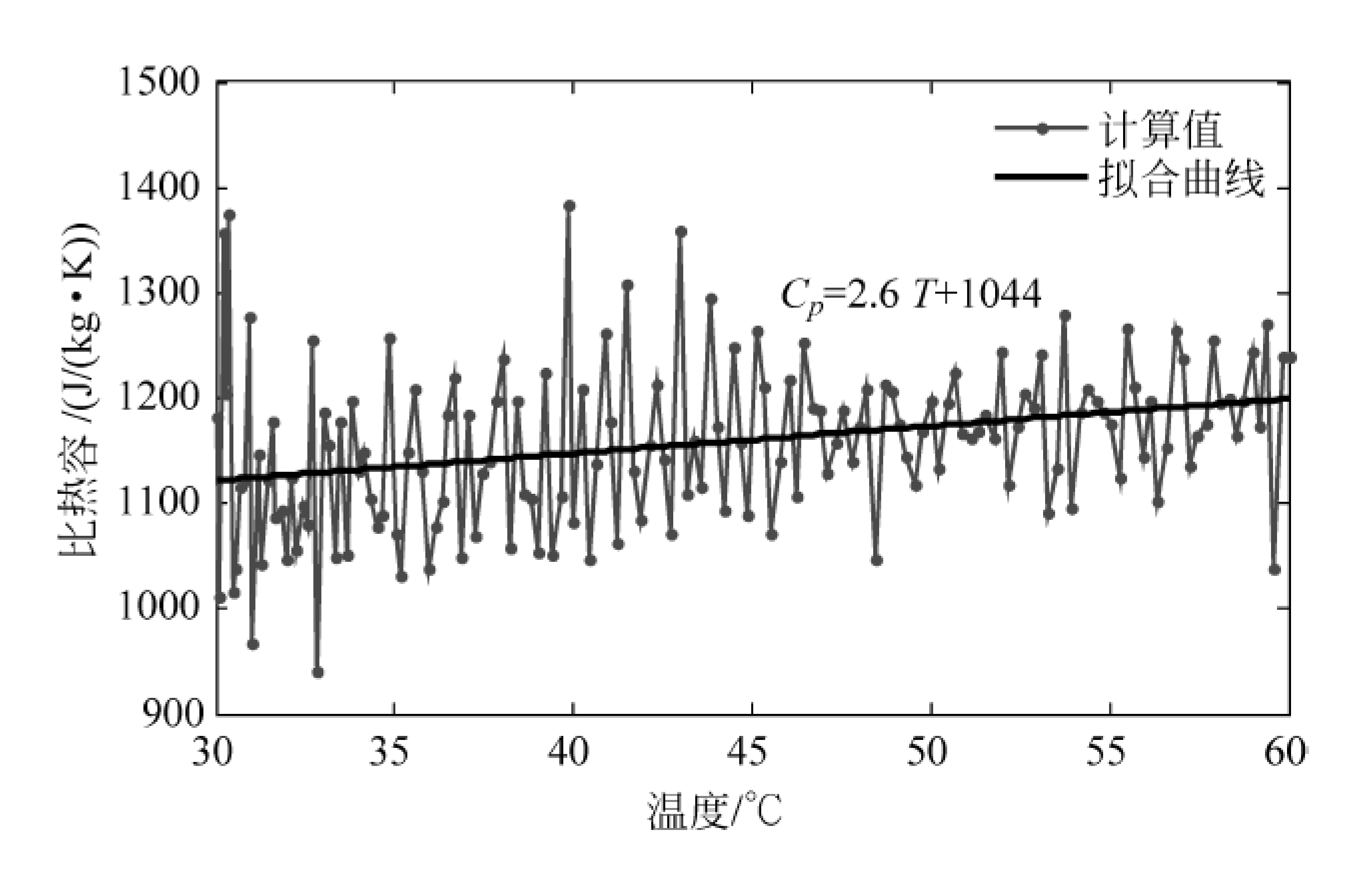


图 10-13 比热容计算结果

（2）有效熵电势测试

为了考虑实车在各种可能的运行工况下的反应产热，此处针对全 SOC 范围、全温度范围内（－20～55℃）的电池反应热进行测试。

有效熵电势测试的具体步骤见表 10-14。

表 10-14 有效熵电势测试步骤

步骤	操　　作
调整 SOC	温箱调至 25℃，静置 3 h 至电池温度平衡，以 1 C 倍率放电至截止电压(调整电池 SOC 为 0)
1. 静置	静置 3 h 至温度平衡，并测量开路电压
2. 静置	温箱调至 55℃，静置 3 h 至电池温度平衡，并测量开路电压
3. 静置	温箱调至 25℃，静置 3 h 至电池温度平衡，并测量开路电压
4. 静置	温箱调至 0℃，静置 5 h 至电池温度平衡，并测量开路电压
5. 静置	温箱调至－20℃，静置 5 h 至电池温度平衡，并测量开路电压
6. 静置	温箱调至 25℃，静置 5 h 至电池温度平衡，并测量开路电压
7. 调整 SOC	以 1 C 充电依次将电池 SOC 增加 10%，并重复步骤 2～7，直到调整电池 SOC 至 100%

图 10-14 显示了不同温度下开路电压的变化过程示例，需要注意的是，在静置过程中特别是高温静置时会存在由于自放电引起的电压下降。在数据处理中，假设电池自放电造成的电压降与静置时间成正比，通过计算静置段电压变化的斜率来消去自放电的影响。

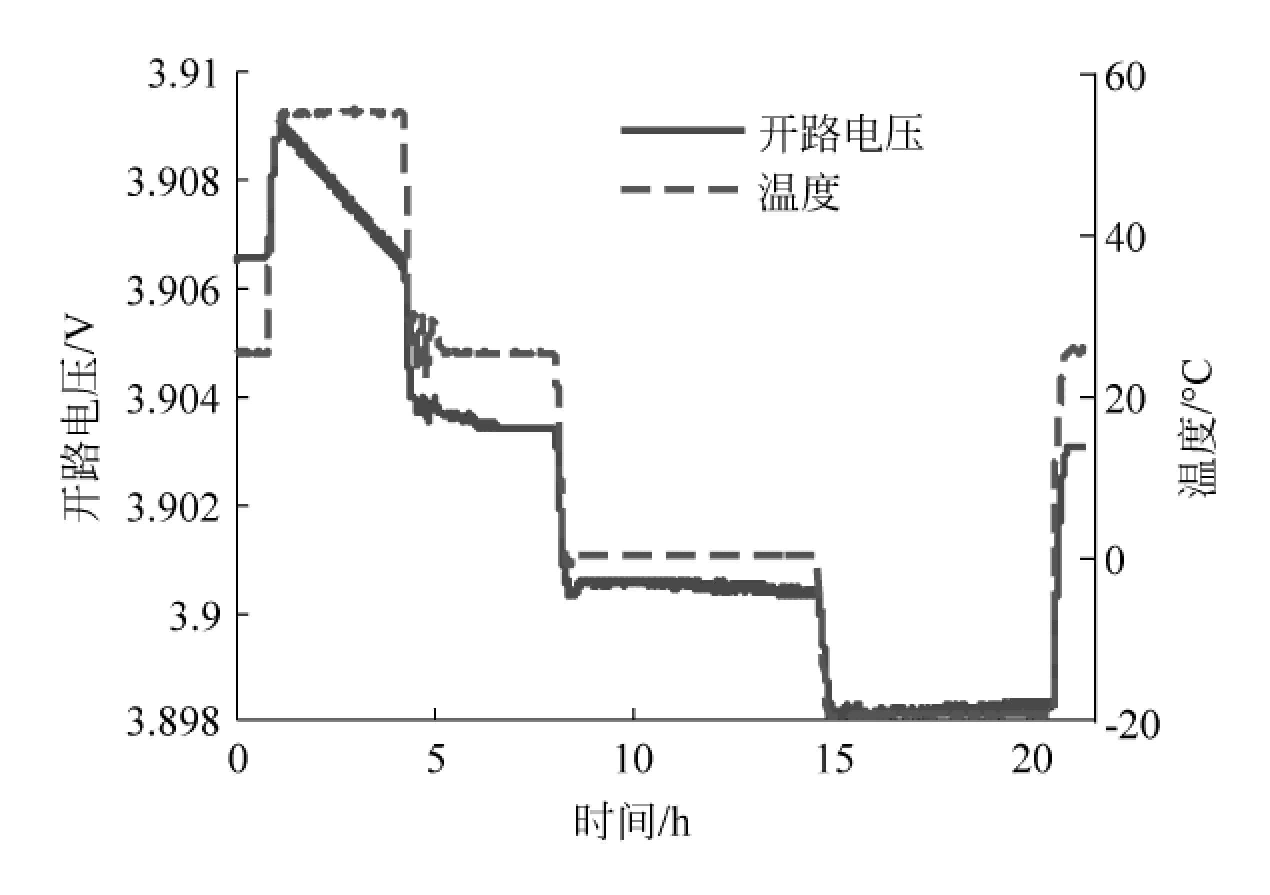


图 10-14 开路电压随温度的变化曲线

根据测得的电池电压、温度数据，按公式(1)可以计算得到电池的反应热系数($\mathrm{d}U_{\mathrm{OCV}}/\mathrm{d}T$)。根据电化学原理，正常工作范围内反应热系数 $\mathrm{d}U_{\mathrm{OCV}}/\mathrm{d}T$ 不随温度变化，而熵电势 U_{EP}则可表示为绝对温度 T_{abs}和 $\mathrm{d}U_{\mathrm{OCV}}/\mathrm{d}T$ 的乘积，如公式(2)。图 10-15 给出的是熵电势的测试结果，由曲面对比可见，SOC 对熵电势的影响比温度要大很多。

$$\frac{\mathrm{d}U_{\mathrm{OCV}}}{\mathrm{d}T}=\frac{U_{\mathrm{OCV}}(T_1)-U_{\mathrm{OCV}}(T_2)}{T_1-T_2} \tag{1}$$

$$U_{\mathrm{EP}}=T_{\mathrm{abs}}\frac{\mathrm{d}U_{\mathrm{OCV}}}{\mathrm{d}T} \tag{2}$$

(3) 电池热失控特性测试

电池热失控特性试验在 EV-ARC 中进行，EV-ARC 可以保证腔内环境温度与电池温度

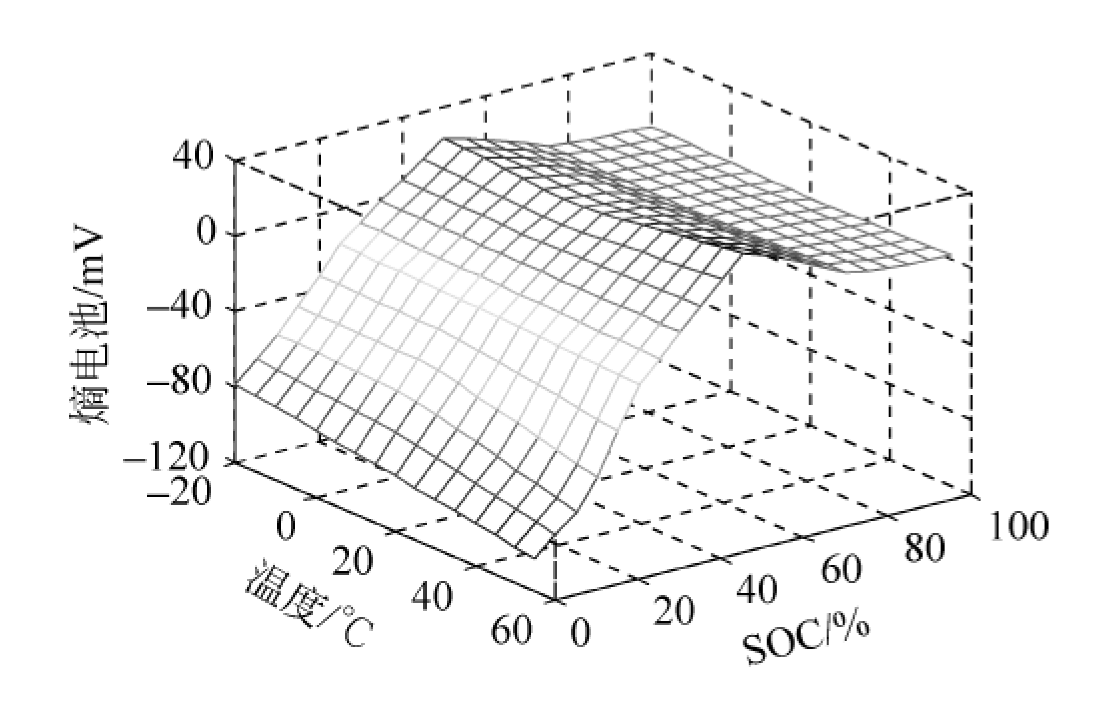


图 10-15　有效熵电势测试结果

始终保持一致，避免电池对外散热，模拟绝热环境，从而可以得到绝热环境下的电池自产热导致的温升，可以用于建立锂离子电池热失控模型和评估锂离子电池的安全性。

电池热失控特性测试的具体步骤见表 10-15。

表 10-15　电池热失控特性测试步骤

步骤	操　作
1. 传感器布置①	为保证 EV-ARC 本身自带的 N 型热电偶（测量 T_S）与电池样品表面贴紧，用夹具将其紧压在电池中心位置。同时为了获得准确的热失控最高温度，另外增加一套温度测量装置，测量内部温度 T_C
2. 加热	从当前温度开始，加热至设定温度 T_{arget}（T_{arget}一般比当前温度高 5℃）
3. 等待②	加热完成后，进行一段时间的等待（wait），以保证样品达到热平衡
4. 寻峰	等待后，ARC 根据样品温度 T_S及其变化率 dT_S/dt，判定样品是否开始自产热。如果 ARC 判定样品开始自产热，即检测到样品的自升温速率大于 ARC 设定的检测灵敏度（sensitivity）时，如 0.01℃/min，进入“绝热（exotherm）”阶段。否则，重新回到步骤 2 加热
5. 绝热	ARC 将会跟踪样品的温度，模拟绝热环境
6. 记录	记录温度、电压等试验数据，完成试验

注：① 对于软包电池可以将温度传感器插入两节并联电池之间，并用高温胶带重新捆绑，该温度所测得的数值可以作为电池内部温度 T_C；其他电池根据具体情况，可能需要对电池进行改造布置。

② 等待时间需要标定得到（等热容物标定），一般大容量电池取 30 min。

电池热失控特性测试结果如图 10-16 所示（图中 T_{sep}为隔膜溶解温度），测试开始后，ARC 重复进行加热等待寻峰过程；当电池达到 T_1温度时，样品的自升温速率大于 ARC 设定的检测灵敏度，进入绝热阶段；当电池达到 T_2温度时，电池发生热失控，温升速率急剧增加，在短时间内达到最高温度 T_3。

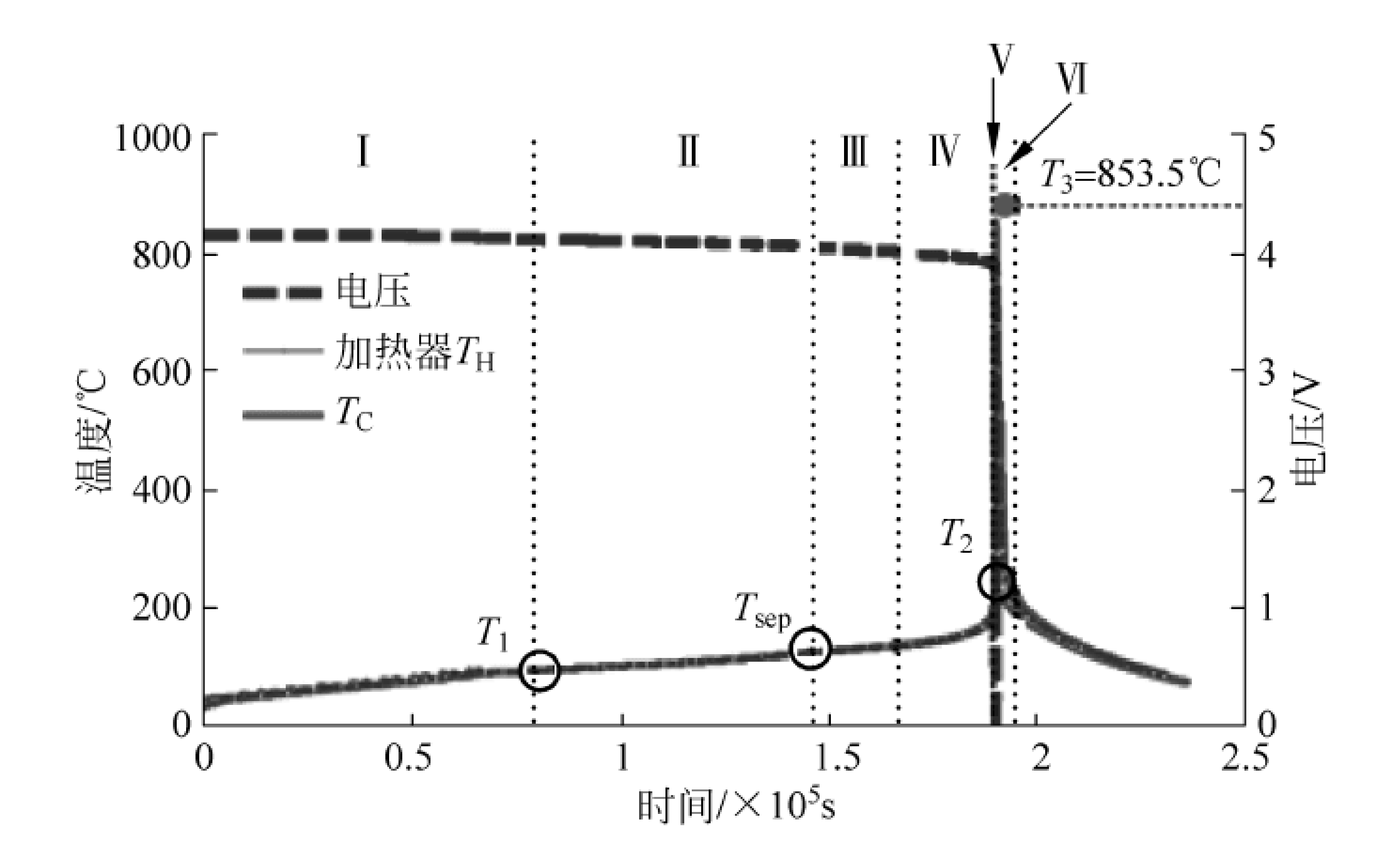


图 10-16 电池热失控特性测试结果

参 考 文 献

[1] 李哲.纯电动汽车磷酸铁锂电池性能研究[D].北京：清华大学，2011.

[2] FreedomCAR Battery Test Manual for Power-Assist Hybrid Electric Vehicles. INEEL，October，2003.

[3] 冯旭宁.车用锂离子动力电池热失控诱发与扩展机理、建模与防控[D].北京：清华大学，2017.

[4] 刘光明.面向电动汽车续驶里程估计的电池剩余放电能量预测研究[D].北京：清华大学，2015.

[5] 李哲，韩雪冰，卢兰光，欧阳明高. 动力型磷酸铁锂电池的温度特性[J]. 机械工程学报，2011，47(18)：115-120

[6] Li Zhe，Lu Languang，Ouyang Minggao，et al. Modeling the capacity degradation of LiFePO4/graphite batteries based on stress coupling analysis [J]. Journal of Power Sources，2011，196：9757-9766.

[7] Liu Guangming，Ouyang Minggao，Lu Languang，et al. Analysis of the heat generation of lithium-ion battery during charging and discharging considering different influencing factors [J]. Journal of thermal analysis and calorimetry，2014，116(2)：1001-1010.

[8] Feng Xuning，Fang Mou，He Xiangming，et al. Thermal runaway features of large format prismatic lithium ion battery using extended volume accelerating rate calorimetry [J]. Journal of Power Sources，2014，255：294-301.

第11章 混合动力系统台架试验

11.1 概 述

节能与新能源汽车包括纯电动汽车、混合动力汽车、燃料电池汽车、氢发动机汽车等多种类型。油电混合动力汽车是通过动力耦合装置将内燃机和电机两种动力源结合共同驱动车辆，一方面继承了内燃机汽车石油燃料高比能量和高比功率的优点，又发挥了纯电动汽车高效率和低排放的优点。插电式混合动力汽车(plug-in hybrid electric vehicle，PHEV)是指可外接充电的混合动力汽车，PHEV 一般采用较大容量的电池，可以依靠电能行驶较远的距离。

混合动力系统开发一般采用基于模型的开发流程，包括离线仿真、快速原型、硬件在环仿真、台架试验以及实车标定等过程。其中台架试验已成为混合动力系统研究和开发的重要手段，通过台架试验可以测试零部件特性，对动力总成各部件进行性能评估，为仿真建模提供特征参数；目前动态测功机有足够的控制精度和响应速度，可以进行整车道路工况模拟，在台架上可以进行整车控制策略的开发和验证；通过台架试验还可以进行整车动力性测试及工况循环经济性测试，对动力总成进行耐久性考核。由此可见，通过台架试验可以对混合动力系统零部件及动力总成进行全面的测试，减少实车测试及标定的工作量，缩短混合动力汽车的开发周期。本章着重对油电混合动力台架系统及试验方法进行介绍。

11.2 混合动力系统结构及工作原理

11.2.1 系统构型及特点

混合动力系统一般由多能源动力、电机、传动装置以及各部件的控制系统组成。目前常见的混合动力系统结构包括串联式、并联式、混联式等几种形式。串联式系统结构如图 11-1 所示，内燃机不直接驱动汽车，而由电动机产生的动力驱动汽车，动力电池能够存储

并提供电能，当动力电池存储的电能下降到一定程度，由内燃机带动发电机发电，其输出电能可以直接传递给电动机，也可以存储在动力电池中。串联混合动力系统中，由于内燃机和驱动桥之间没有机械连接，内燃机工况控制和调节可独立于汽车行驶工况，整车控制器可以控制内燃机在高效率工况点工作，提高动力系统效率。

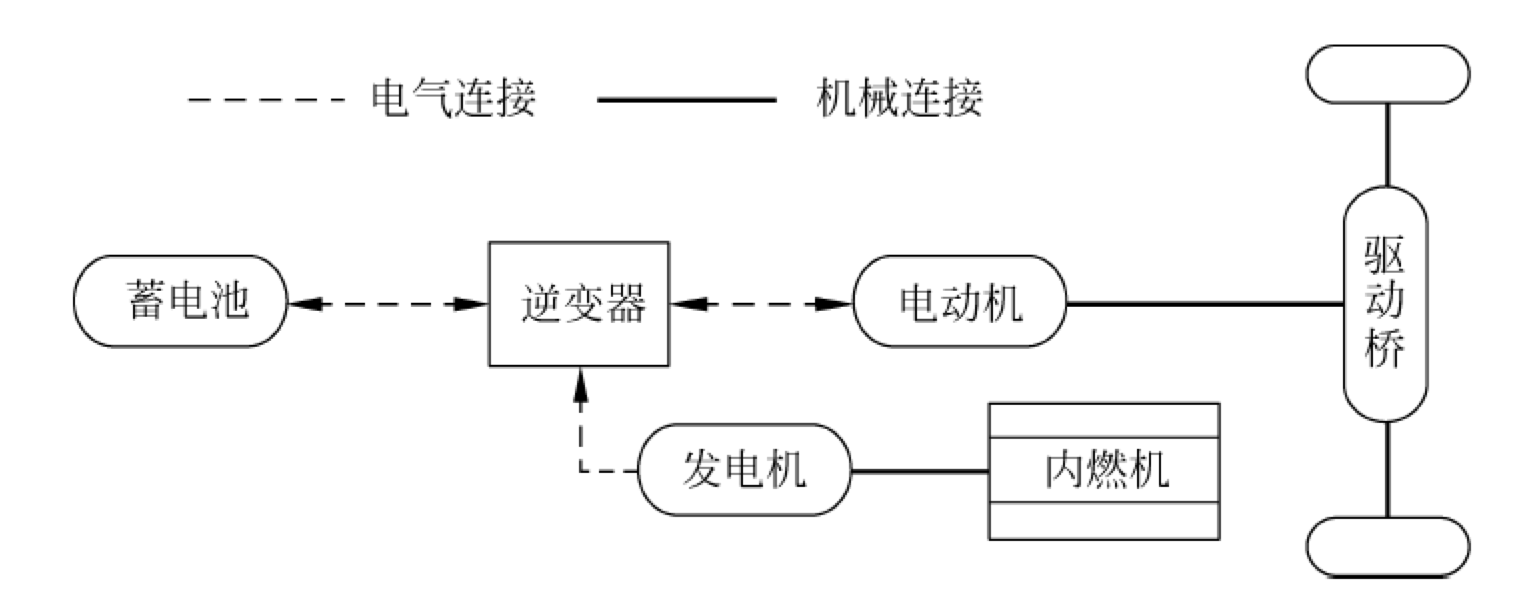


图 11-1　串联式混合动力系统

单轴并联式混合动力系统结构如图 11-2 所示，内燃机与驱动桥之间通过机械构件连接，内燃机和电驱动系统的动力输出在动力系统的特定位置耦合。并联混合动力系统可以实现内燃机单独驱动、电动机单独驱动和内燃机电动机混合驱动等模式。根据变速器输入轴端的数量，可以进一步划分为单轴式并联和双轴式并联结构。混合动力控制器可以根据整车工况优化内燃机和电机工况点，提高动力系统整体效率。

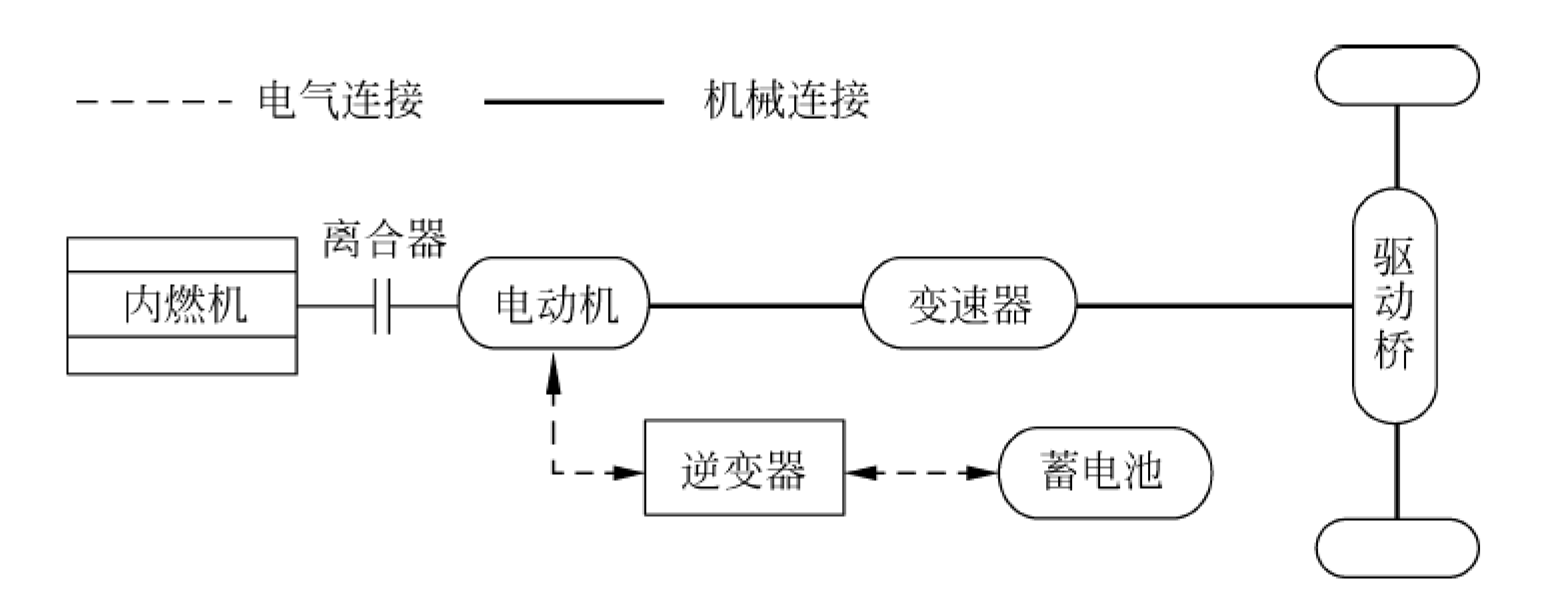


图 11-2　单轴并联式混合动力系统

混联式混合动力系统在结构上综合了串联式和并联式混合动力系统的特点，如图 11-3 所示。与串联结构相比，增加了机械能量的传递方式，与并联结构相比，增加了电能量的传递方式。内燃机的输出功率可以通过机械连接输出到驱动桥，也可以驱动发电机发电。电动机的驱动力矩通过传动装置传递给驱动桥，发电机输出电能可以传递给电动机，也可以存储在动力电池中。混合动力控制器可以根据整车运行工况实现内燃机、发电机和电动机的优化控制，其缺点是系统结构和控制策略较为复杂，成本增加。

混合动力系统可以通过内燃机、电机、传动系统等零部件参数匹配优化以及优化能量管理策略提升整车燃油经济性。通过优化能量管理策略改善燃油经济性具体途径如下。

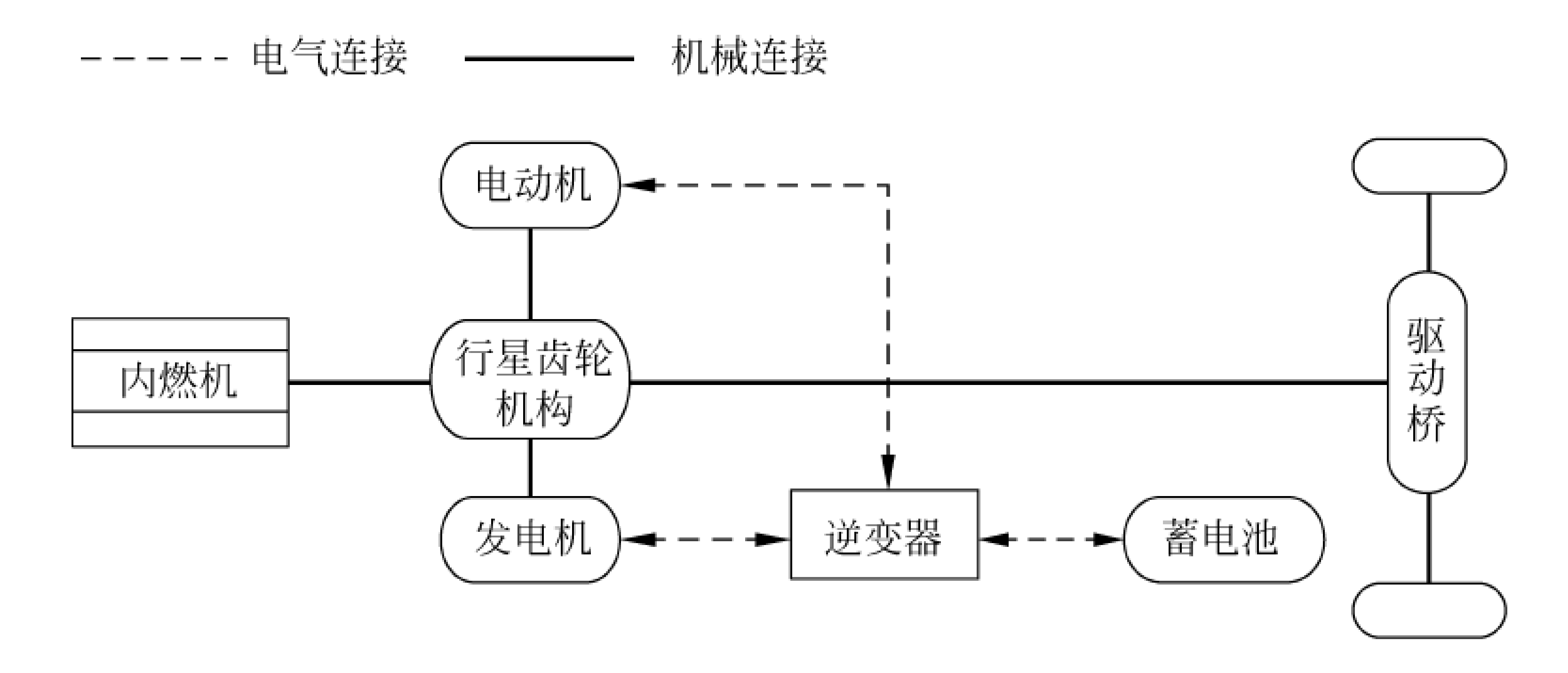


图 11-3　混联式混合动力系统

1. 内燃机怠速停机

内燃机处于怠速状态或车辆减速时关闭内燃机可提高燃油经济性并改善排放，混合动力系统可利用驱动电机快速起动内燃机。

2. 制动能量回收

将制动时整车的动能转化为电能储存在动力电池中，通过制动能量回收策略可以提升燃油经济性。

3. 优化内燃机工况点

混合动力系统可以通过合理分配内燃机和电动机的驱动扭矩优化内燃机工况点，使内燃机工作在最佳燃油消耗曲线的工况点上，提高整车燃油经济性。

4. 附件能量管理优化

内燃机输出的机械能部分用于驱动冷却风扇和空调等附件，通过优化空调等附件的控制可提升燃油经济性。

11.2.2　控制策略工作原理

混合动力整车控制是混合动力汽车的核心技术之一，混合动力控制策略包括能量管理策略和动态协调控制策略。能量管理策略主要实现内燃机和电动机之间动力分配，在满足整车动力需求的前提下，提高整车燃油经济性和降低排放。近年来，研究人员提出了多种能量控制策略，主要分为基于规则的能量管理策略、基于优化的能量管理策略和基于智能算法的能量管理策略等，如图 11-4 所示。

基于规则的能量管理策略根据加速踏板和制动踏板开度、当前车速、电池电量等特性参数，基于预先制定的控制规则来控制内燃机和电动机的输出扭矩。该控制策略又称为电机辅助控制或基线控制策略，是根据实际经验和内燃机稳态特性曲线制定的，如图 11-5 所示。这种策略主要特点是控制算法简单、有较好的鲁棒性并且易于实现，已经应用于实际运行的

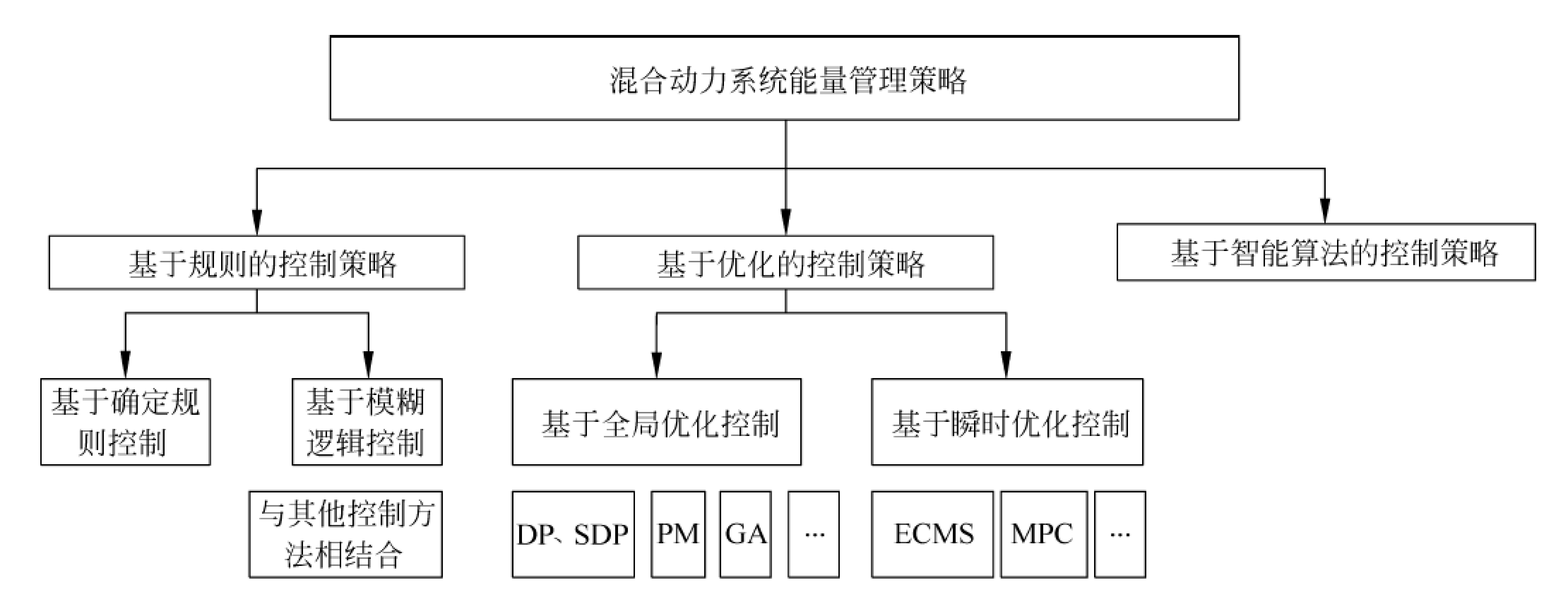


图 11-4 混合动力能量管理策略

混合动力汽车。由于控制策略主要依赖人工经验，并未考虑车辆行驶过程中参数的动态变化，不一定是最优的控制算法。

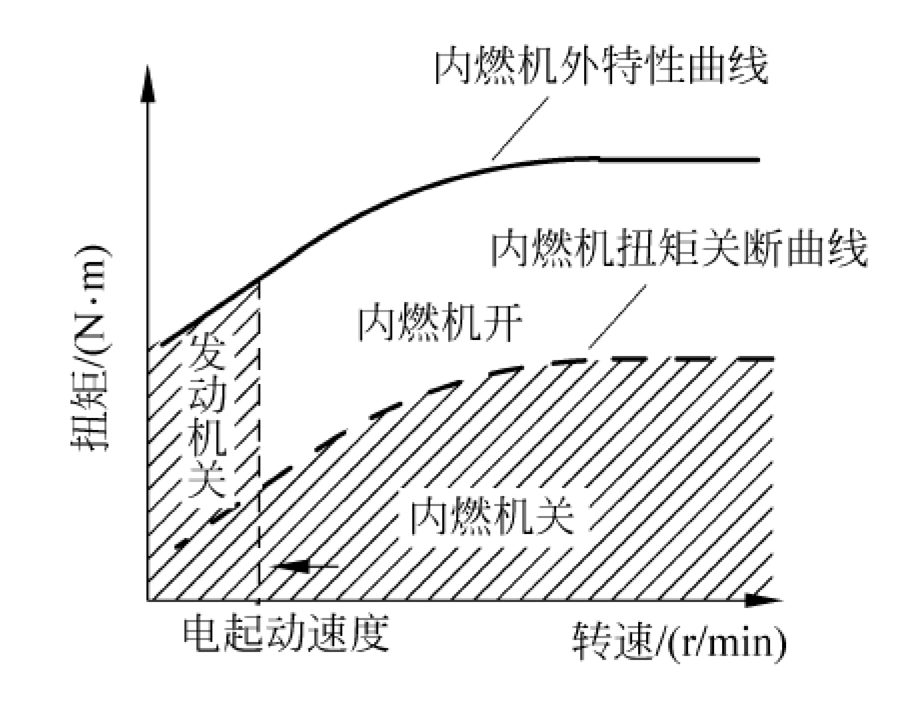


图 11-5 基于规则的能量管理策略示意图

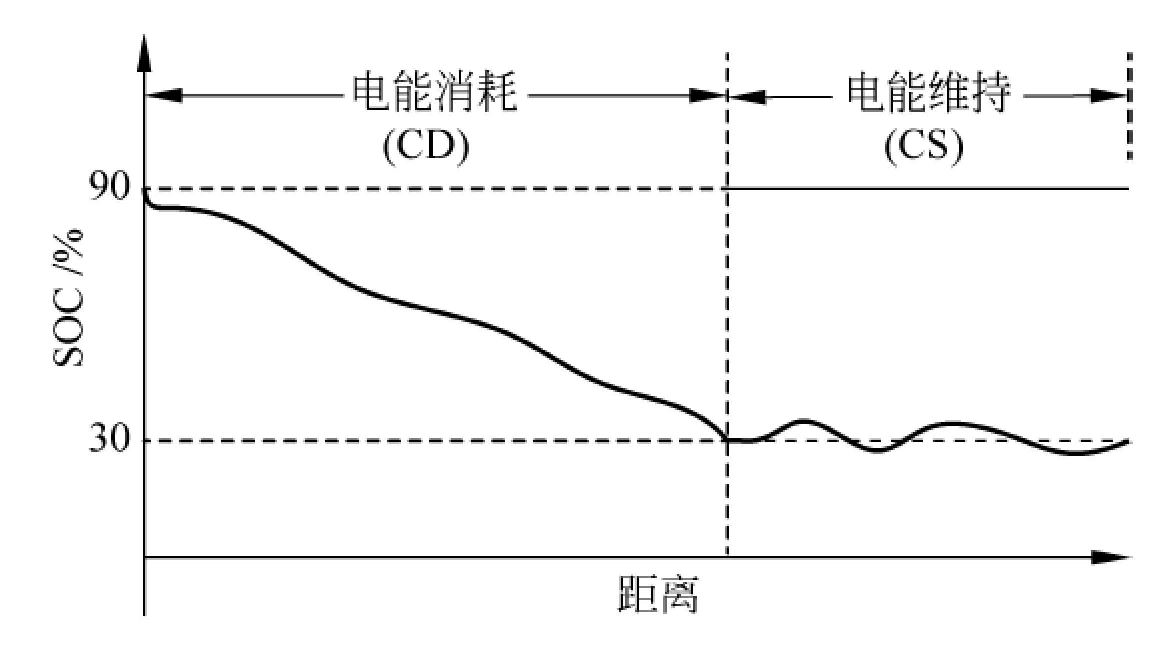


图 11-6 PHEV 能量管理策略的两个阶段

插电式混合动力汽车的能量管理策略一般分为两个阶段，如图 11-6 所示的电能消耗(charge depleting，CD)阶段和电能维持(charging sustaining，CS)阶段。在 CD 阶段电池

SOC 较高，控制器策略充分利用电能来驱动车辆；在 CS 阶段，控制策略尽量维持 SOC 在一个很小的区间内波动。CS 阶段的控制策略与非插电式混合动力汽车的控制策略类似。

混合动力系统动态协调控制策略在模式切换和换挡等动态过程中协调控制各动力源及传动系统工作，提高车辆的平顺性和驾驶舒适性。并联混合动力系统无离合操作换挡过程控制如图 11-7 所示。

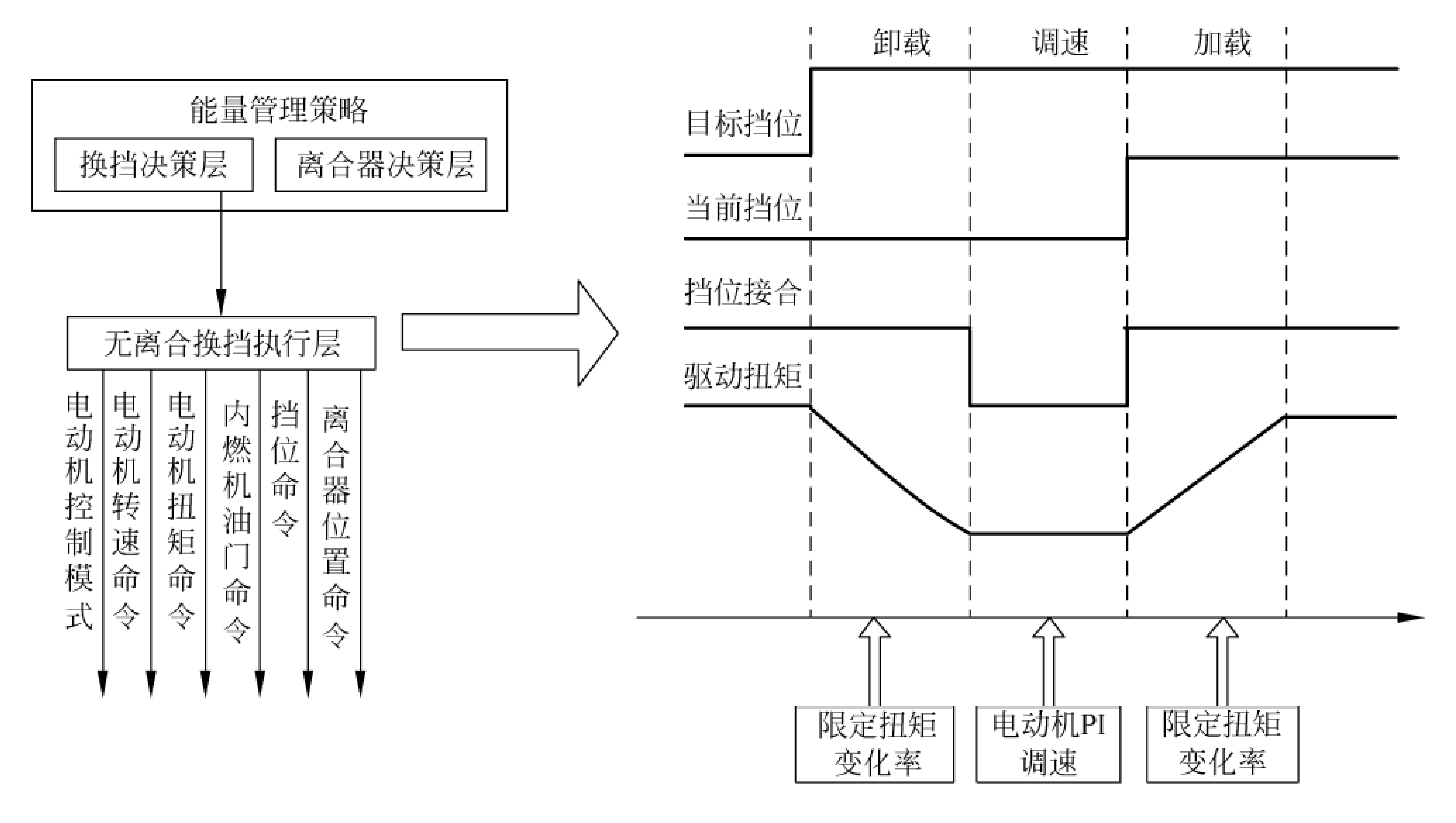


图 11-7　无离合操作换挡过程

11.3　混合动力台架试验系统

11.3.1　台架功能及结构

混合动力系统研究开发过程需要进行的台架试验类型如图 11-8 所示，包括零部件试验和动力总成试验。通过对混合动力系统中多能源动力、传动系统、电机、电池等部件进行性能测试，获取各部件的特性参数，能够为仿真建模及整车控制策略开发提供依据。混合动力台架通过实时控制系统实现驾驶员模拟和整车道路工况模拟功能，可以在台架上实现动力总成的构型研究、动力系统部件参数匹配、混合动力控制策略开发以及整车动力性和经济性等试验。

混合动力台架试验系统结构主要包括测功机、数据采集系统、台架测试设备、实时控制器以及主控计算机系统等部分。目前国际上一些设备供应商已经开发出成熟的混合动力台架产品，比如 AVL 和 HORIBA 公司的台架产品。本章重点介绍作者在从事新能源汽车动力系统集成与控制研究工作中，设计开发的混合动力台架试验系统，如图 11-9 所示，各部分主要功能如下。

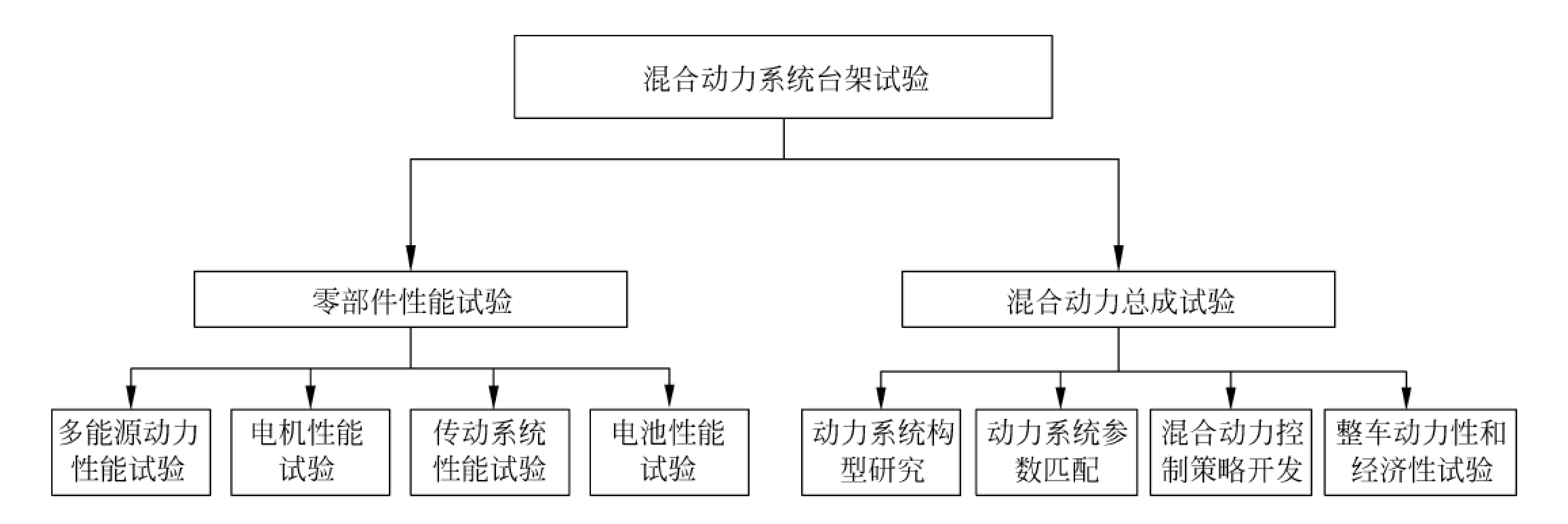


图 11-8 混合动力系统试验类型

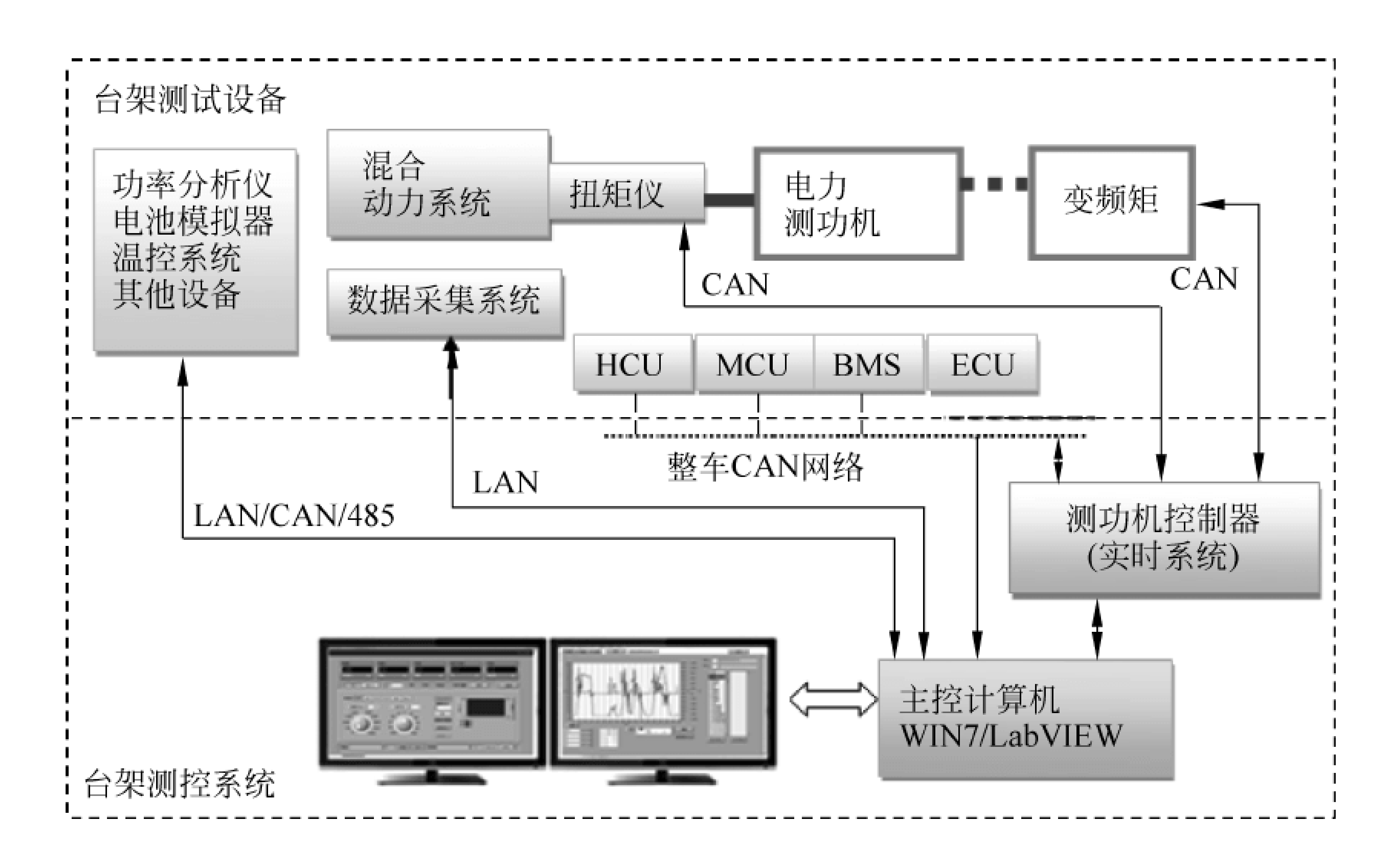


图 11-9 混合动力台架系统结构

(1) 测功机。测功机的作用是作为负载吸收被测动力系统的输出功率，同时测量输出功率。混合动力台架一般采用交流电力测功机，可以工作在电动机模式和发电机模式，通过变频器实现转速和扭矩工况控制，动力系统输出的机械能可以转换成电能回馈到电网。测功机轴端安装编码器用于转速测量，测功机与动力系统之间安装扭矩法兰用于扭矩测量，功率通过转速扭矩计算得到。根据被测动力系统的结构，台架可采用单测功机、双测功机、三测功机以及四测功机等形式。

(2) 数据采集系统。数据采集系统包含温度、电压、电流等采集通道。电机控制器输出的三相交变电流变化较快，对瞬态波形的采集需要较高的采样频率，一般单通道大于 100 kHz。

(3) 功率分析仪。功率分析仪用于电机控制器直流输入端及交流输出端电量的采集，通过计算可得到电机控制器效率。

(4) 动力电池模拟装置。混合动力台架上一般采用双向直流电源作为动力电池模拟装置，双向直流电源不仅能模拟电池包给电驱动系统供电，也能吸收电驱动系统发出的电能。

(5) 温控系统。混合动力系统工作过程中，内燃机、电机以及测功机都会释放出大量的热能使得温度升高，温控系统通过水冷方式将台架各部件温度控制在一定范围内。

(6) 台架控制器。台架控制器采用嵌入式工业计算机和实时操作系统，能够运行整车动力学模型和驾驶员模型，控制测功机实现整车道路工况模拟功能。

(7) 主控计算机。主控计算机系统通过通信接口与台架各个设备连接，实现工况设定、数据采集、台架试验流程控制和数据处理等功能。

(8) 其他设备。台架系统还包括联轴器、保护罩、测功机底座、标定系统等机械附件。

11.3.2　混合动力台架控制技术

混合动力台架试验可以分为稳态试验和动态试验两种类型，稳态试验一般用于零部件稳态工况下的性能测试，包括电机稳态特性测试、变速器效率测试等。动态试验通过台架系统模拟整车道路工况，对动力系统进行加减速及循环工况测试。混合动力台架系统测功机和被测动力系统控制模式的组合有 N/M、M/N 模式(稳态工作模式)和 RG/P、RG/V(动态工作模式)。

台架试验过程中测功机控制器实现台架系统的实时工况控制，其主要模式如表 11-1 所示。其中，N/M 和 M/N 为稳态控制模式，RG/P 和 RG/V 为动态控制模式。

表 11-1　混合动力台架控制模式

控制模式	测功机工作模式	动力系统工作模式
N/M	转速控制	扭矩控制
M/N	扭矩控制	转速控制
RG/P	道路工况模拟	加速踏板控制
RG/V	道路工况模拟	车速控制

(1) N/M 模式。该模式下，测功机处于转速控制模式，动力系统处于扭矩控制模式。该模式通常用于电动机外特性及部分负荷特性测试。

(2) M/N 模式。该模式下，测功机处于扭矩控制模式，动力系统处于转速控制模式。该模式经常用于电动机转速模式的控制特性测试。

(3) RG/P 模式。该模式下，测功机模拟道路阻力，动力系统根据加速踏板和制动踏板设定值输出扭矩。该控制模式常用于测试动力系统的加速以及再生制动等性能。

(4) RG/V 模式。该模式下，测功机模拟道路阻力，驾驶员模型控制加速踏板和制动踏板实现车速跟踪。该控制模式通常用于循环工况测试，用于测试动力系统的动力性、经济性

和排放性能。

动态控制模式下台架控制器运行整车动力学模型和驾驶员模型模拟道路工况，控制较为复杂，下面以单轴并联混合动力系统为例说明台架系统的动态控制原理，如图 11-10 所示。待测动力系统为单轴并联结构，包括内燃机、离合器、电动机、AMT(automated manual transmission)以及 HCU(hybrid control unit)，变速器输出端与测功机连接，台架试验过程中，测功机控制器实时采集变频柜转速信号以及扭矩仪发送的扭矩信号，根据整车配置参数和整车动力学模型进行实时计算，控制测功机实现整车道路工况下的负载模拟。驾驶员模型根据目标车速计算加速踏板和制动踏板开度实现车速的跟踪，踏板信号通过模拟量接口输出给混合动力系统。因为台架不包含实际机械制动系统，机械制动扭矩部分通过模型计算模拟。

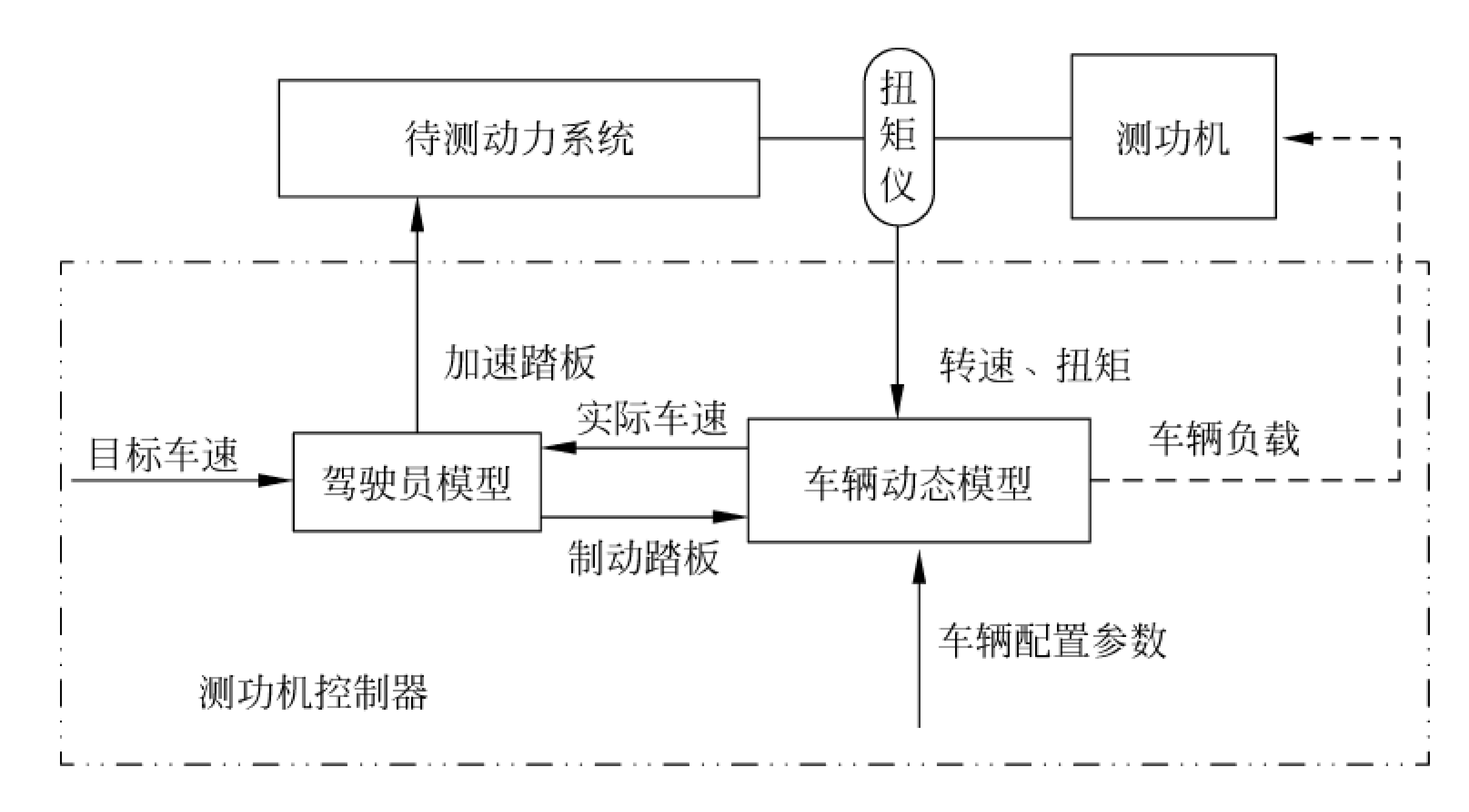


图 11-10 动态控制模式工作原理

车辆在道路上行驶过程的行驶阻力方程为

$$F_v = F_f + F_w + F_j \tag{11-1}$$

式中：F_w——风阻；

F_f——摩擦阻力；

F_j——惯性阻力。

整车驱动力和制动力与上述几部分阻力达到平衡，即 $F_v=F_f+F_w+F_j$。测功机控制器采用转速跟踪算法实现整车道路阻力和惯量模拟，转速跟踪算法中不包含微分环节，算法稳定性较好。控制框图如图 11-11 所示。

控制算法的原理是根据实测的动力系统输出轴的扭矩 $T_p(s)$ 和车辆模型 $G_v(s)$，计算预期的变速器输出轴速度 $\omega_t(s)$，转速跟踪控制器 $G_t(s)$ 根据计算的 ω_t 和实测的输出轴转速 $\omega_b(s)$ 计算负载扭矩 $T_l(s)$，使得动力系统能够跟踪模型计算的预期转速，实现模拟车辆动态工况的目的。如果 ω_b 能够快速准确跟踪 ω_t，则台架上的动力系统输出端的转速和扭矩就与实车道路运行时接近，台架实际控制效果与测功机加载响应速度有关。驾驶员模型根据设

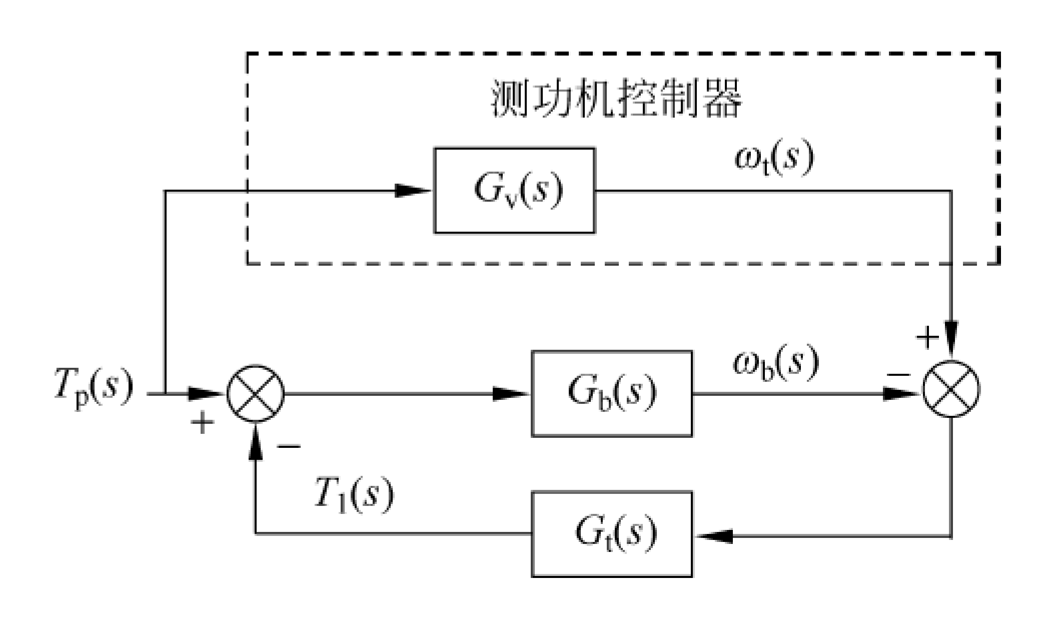


图 11-11　测功机控制器控制框图

定车速，采用一个 PI 控制器控制加速踏板和制动踏板实现车速跟踪，如图 11-12 所示，其中比例控制部分采用分段变参数比例控制器，可以实现较好的车速跟踪效果。

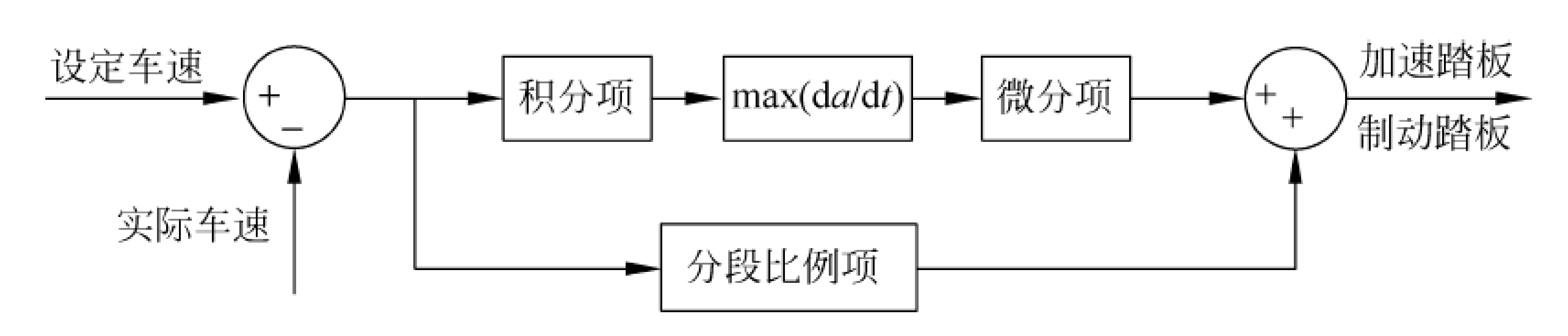


图 11-12　驾驶员模型控制框图

主控计算机系统硬件采用 PCI 总线工业控制计算机，通过 PCI 总线和 LAN 总线扩展各种高速数据采集和通信接口。主控计算机通过 LAN 接口与测功机控制器通信实现测功机信息采集和控制命令传输，通过 PCI 总线扩展 CAN 和 RS485 通信接口与混合动力 CAN 网络和其他设备通信，通过 LAN 接口连接 CDAQ 数据采集模块。主控计算机软件基于虚拟仪器开发平台 LabVIEW 开发，实现数据采集、试验流程控制、界面显示、数据处理等多个任务。主控计算机系统结构框图如图 11-13 所示，虚拟仪器界面如图 11-14 所示。

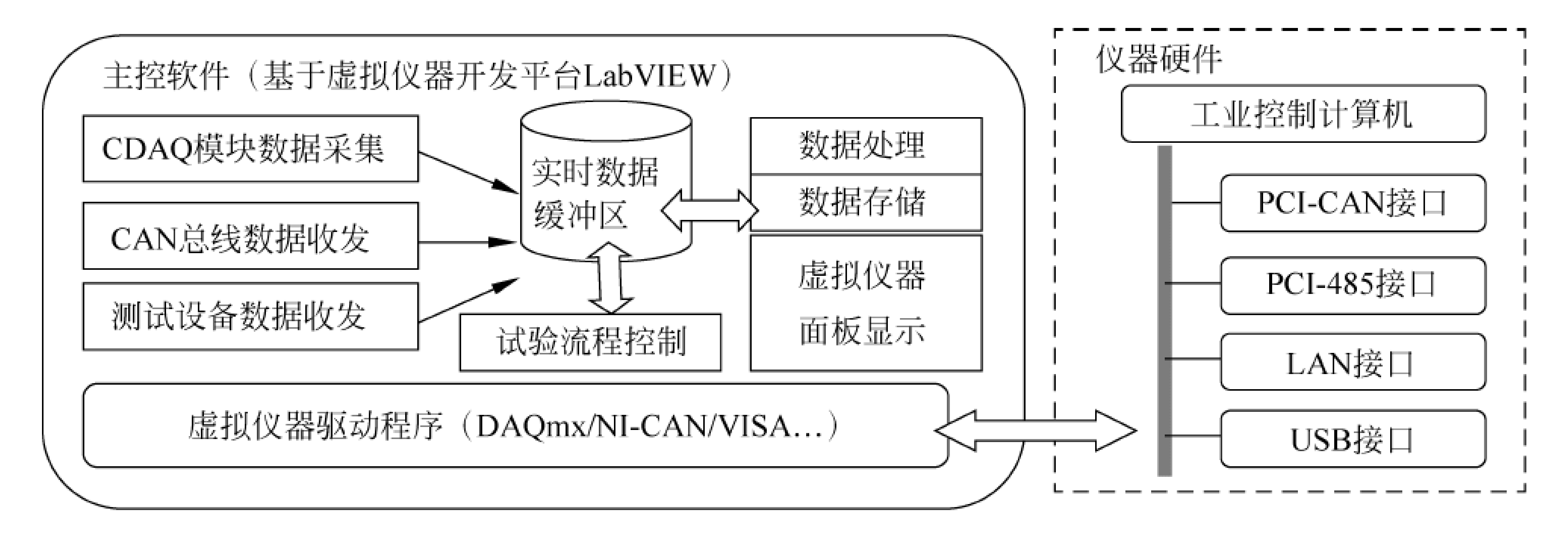


图 11-13　主控计算机软件架构

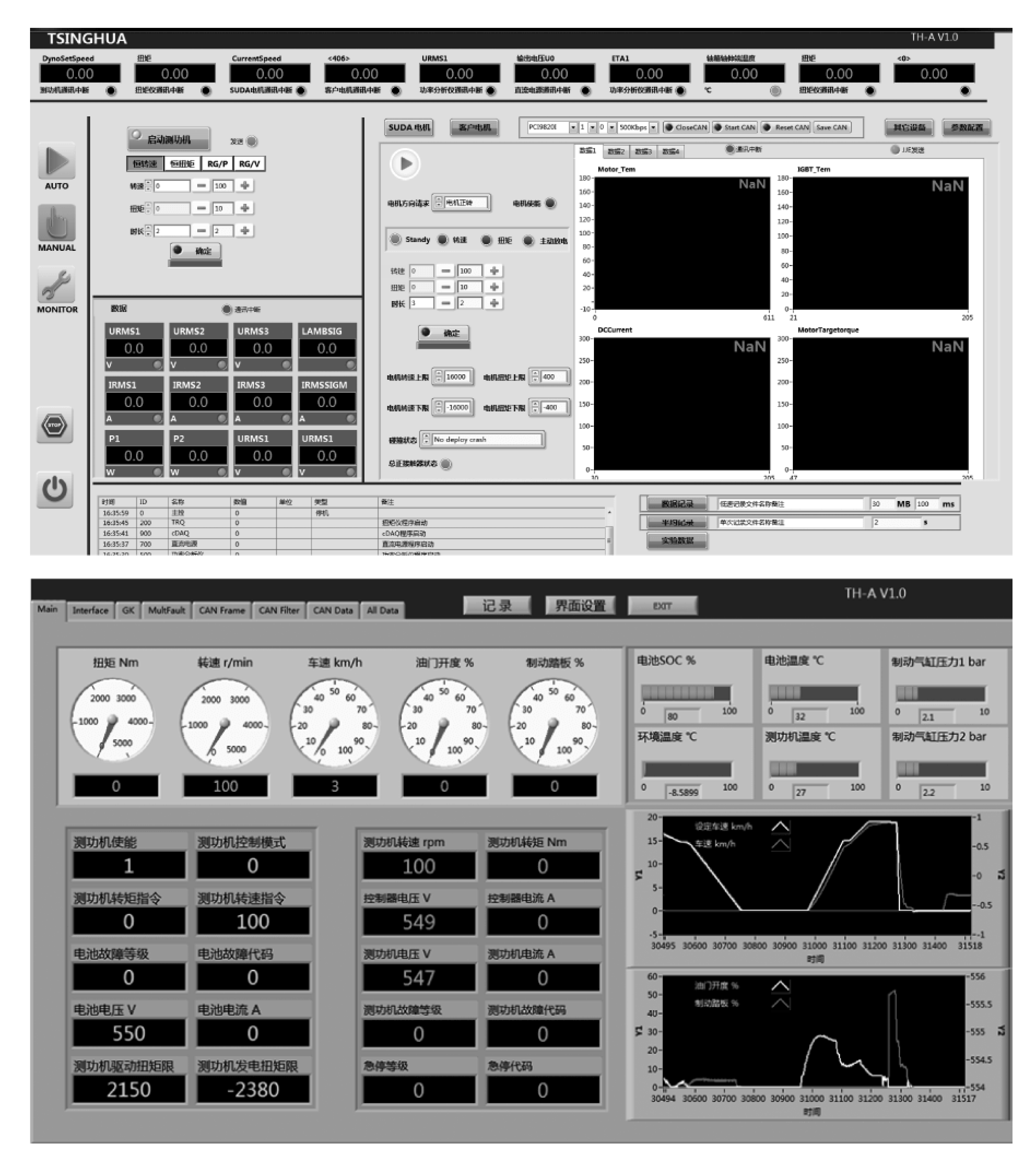


图 11-14 主控计算机虚拟仪器界面

11.4 混合动力台架应用

11.4.1 电机测试台架

电机测试台架可以实现电驱动系统的外特性、部分负荷特性、再生制动特性、效率特性和扭矩响应特性等测试，通过电机台架获取相应的特性参数和曲线，为整车建模仿真和控制策略开发提供依据。电机测试台架结构如图 11-15 所示，由被测电机、双向直流电源、测功机、变频柜、扭矩仪、功率分析仪、数据采集系统、变速装置、机械连接装置、其他测试设备及

主控计算机等部分组成。测功机系统作为负载装置实现电机工况控制和机械功率测量；当电机转速或扭矩范围超过测功机最高转速或扭矩时，可通过变速装置实现与测功机转速扭矩特性的匹配；双向直流电源按照预先设定的电压给电机控制器供电；功率分析仪实现电机控制器直流输入端和交流输出端功率测量；数据采集系统可采集电压、电流、温度、振动等传感器输出信号；主控计算机通过 CAN、RS485、LAN 等通信总线与电机控制器及测试设备连接实现测试过程的数据采集、流程控制和数据处理。

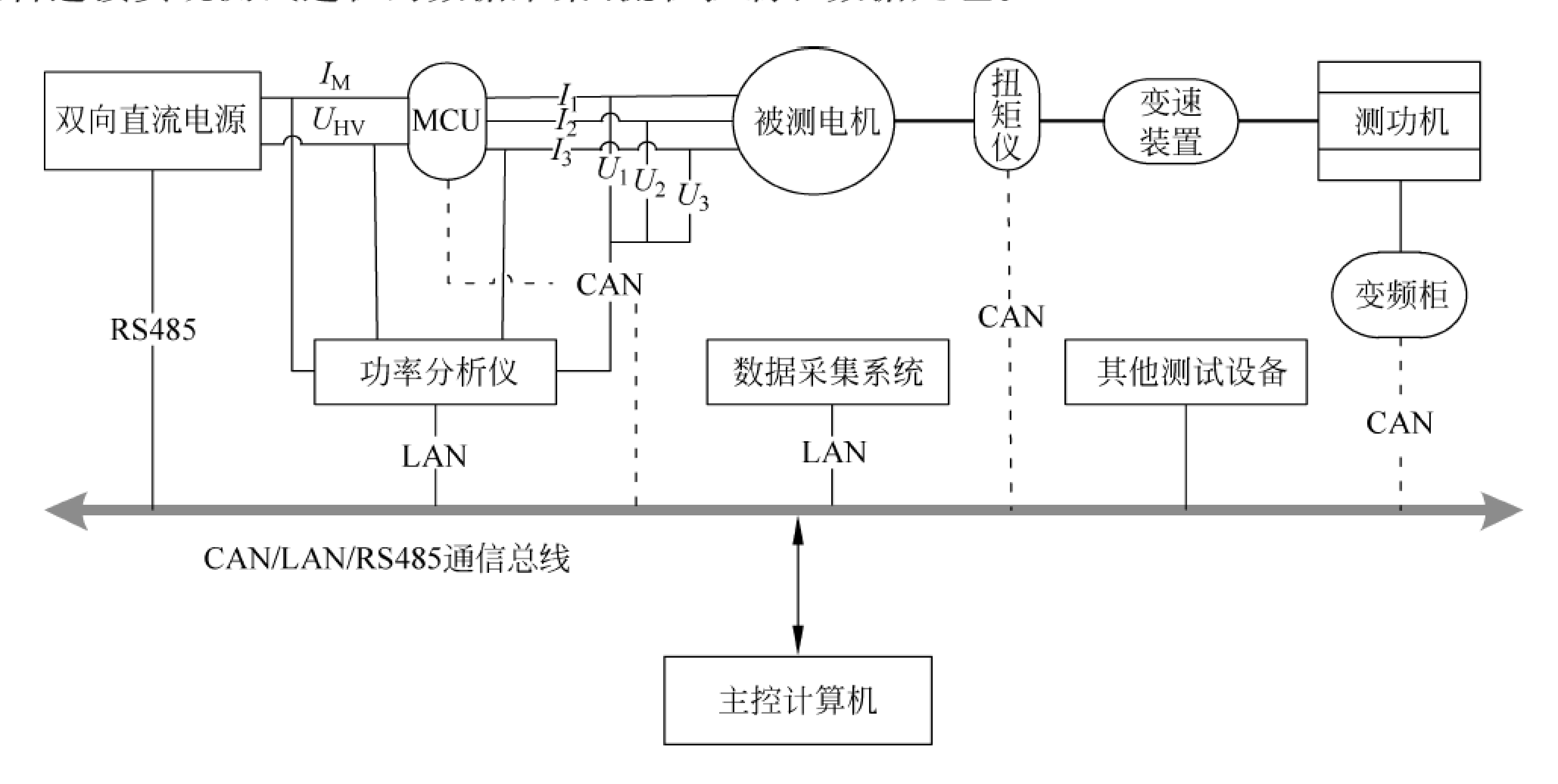


图 11-15 电机测试台架结构框图

电机外特性试验方法：

(1) 双向直流电源工作在恒压模式，设定为电机的额定电压；

(2) 测功机恒转速控制，从一个较小的工作转速(比如 100 r/min)按照固定步长(比如 200 r/min)增加至电机最高转速；

(3) 电机工作在扭矩控制模式，设定为最大扭矩；

(4) 对各工况点转速、扭矩、电压、电流及其他参数进行测量，得到电机外特性曲线。

电机效率特性试验方法：

(1) 双向直流电源工作在恒压模式，设定为电机的额定电压；

(2) 测功机恒转速控制，从一个较小的工作转速(比如 100 r/min)按照固定步长(比如 200 r/min)增加至电机最高转速；

(3) 电机工作在扭矩控制模式，在每一个转速下，以一个较小工作扭矩(比如 10 N·m)按照固定步长(比如 20 N·m)增加到该转速下的最大正扭矩；以一个较小工作负扭矩(比如－10 N·m)按照规定步长(比如－20 N·m)减小到该转速下最小的负扭矩；

(4) 对每个工况点的电机转速、扭矩、电压和电流进行记录，计算电机在每个工况点下的效率。

图 11-16(a)是某一款额定功率为 75 kW 的交流电机的外特性曲线；图 11-16(b)是某一款额定功率为 45 kW 的交流电机的电机效率 MAP 图。

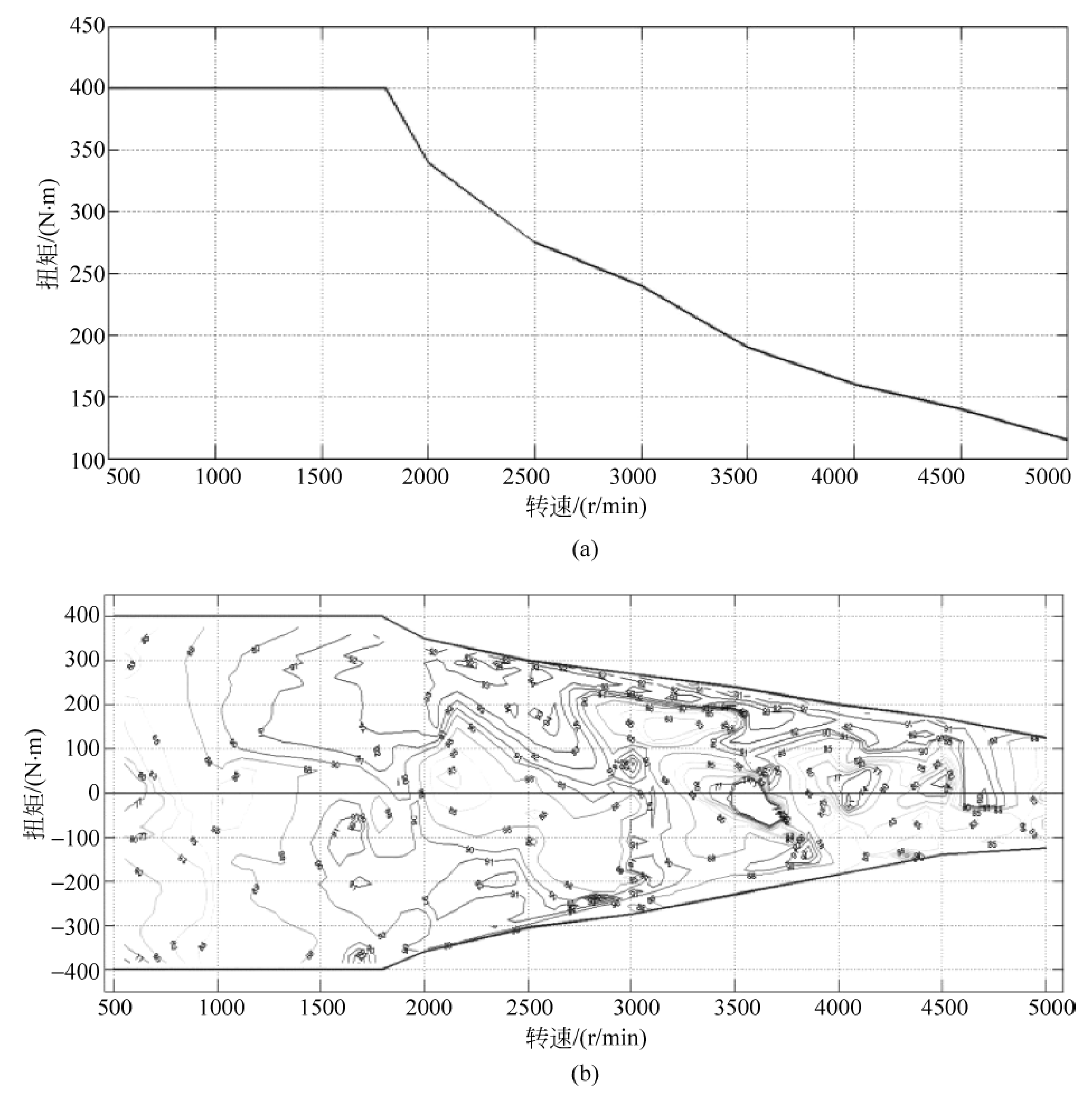


图 11-16 电机外特性曲线及效率 MAP 图

(a) 电机外特性曲线；(b) 电机效率 MAP 图

11.4.2 变速器测试台架

变速器测试台架可实现变速器的扭矩传递效率、换挡平顺性以及可靠性和耐久性测试，获取相应的参数和曲线，为变速器选型以及整车控制策略开发提供依据。变速器测试台架如图 11-17 所示，由三个测功机、三个扭矩仪、数据采集系统、被测变速器、差速器、机械连接装置、其他测试设备及主控计算机等部分组成。测功机 3 与变速器的输入轴相连，为动力装置提供驱动力；测功机 2 和测功机 1 分别与差速器的两个半轴相连，作为负载装置实现内

燃机工况控制和机械功率测量；数据采集系统可采集温度、振动等传感器输出信号；主控计算系统通过 CAN、RS485、LAN 等通信总线与变速器控制器及测试设备连接实现测试过程的数据采集、流程控制和数据处理。

变速器传动效率试验方法：

(1) 测功机 2 和测功机 1 为转速控制模式，从一个较小的转速(比如 500 r/min)按照固定步长(比如 200 r/min)增加到最大转速；

(2) 测功机 3 为扭矩控制，从一个较小的扭矩(比如 10 N·m)按照固定步长(20 N·m)增加到测功机 1 在该转速下的最大扭矩；

(3) 利用 TCU(transmission control unit)对变速器进行换挡，对变速器每个挡位工况点的转速和扭矩进行记录，计算变速器的传动效率。

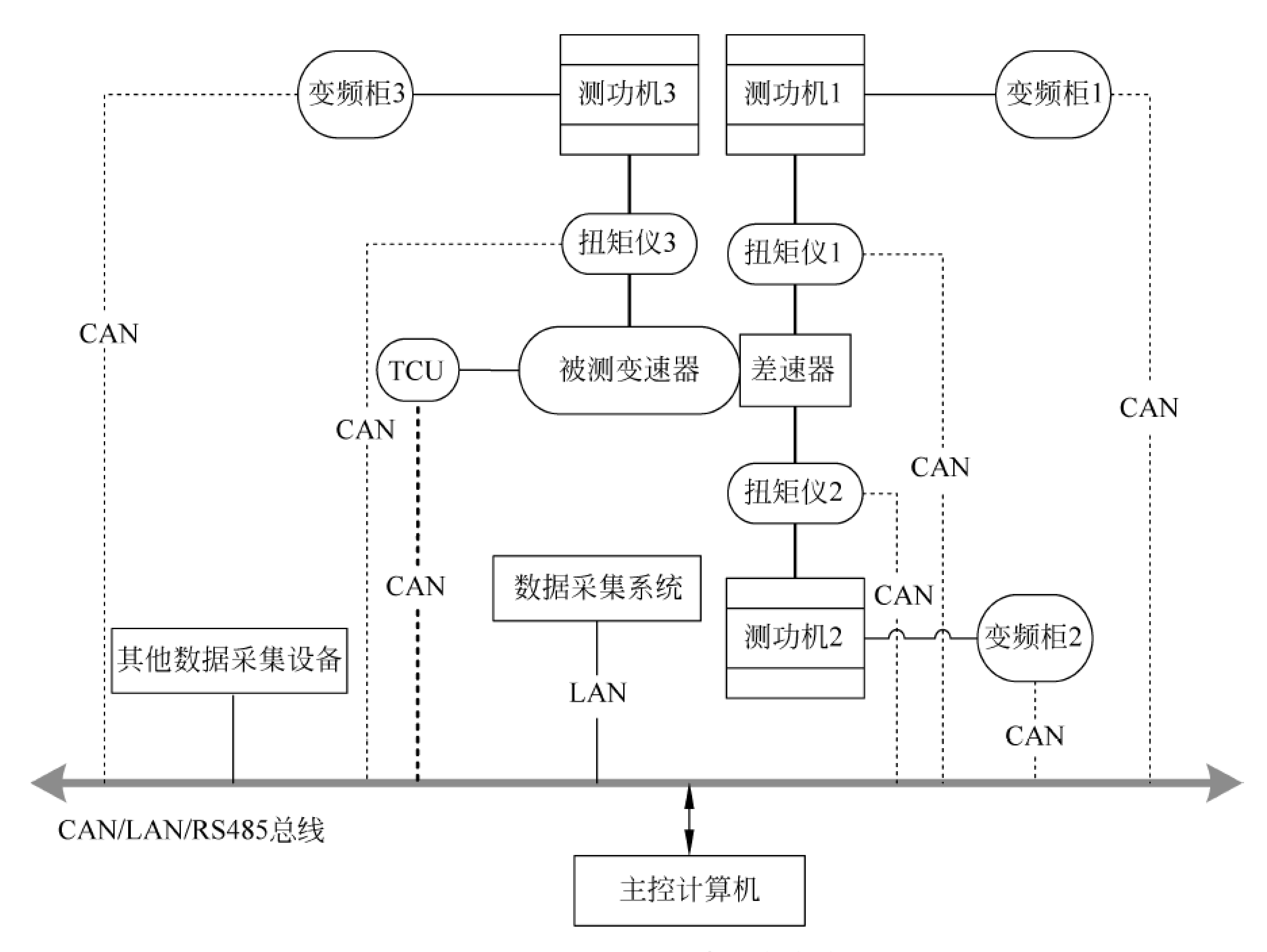


图 11-17　变速器测试台架结构框图

11.4.3　混合动力系统测试台架

混合动力系统测试台架能够实现整车动力系统的动力性、燃油经济性、整车控制策略的验证及标定等测试内容。由于混合动力系统有串联式、并联式和混联式等多种构型，混合动力系统台架也具有多种结构形式，图 11-18、图 11-19 分别为单轴并联式和四驱混合动力系统测试台架结构框图。混合动力系统台架由测功机、扭矩仪、双向直流电源、被测混合动力系统数据采集系统、机械连接以及其他测试设备构成。各部分功能与电机台架和变速器台架相同。

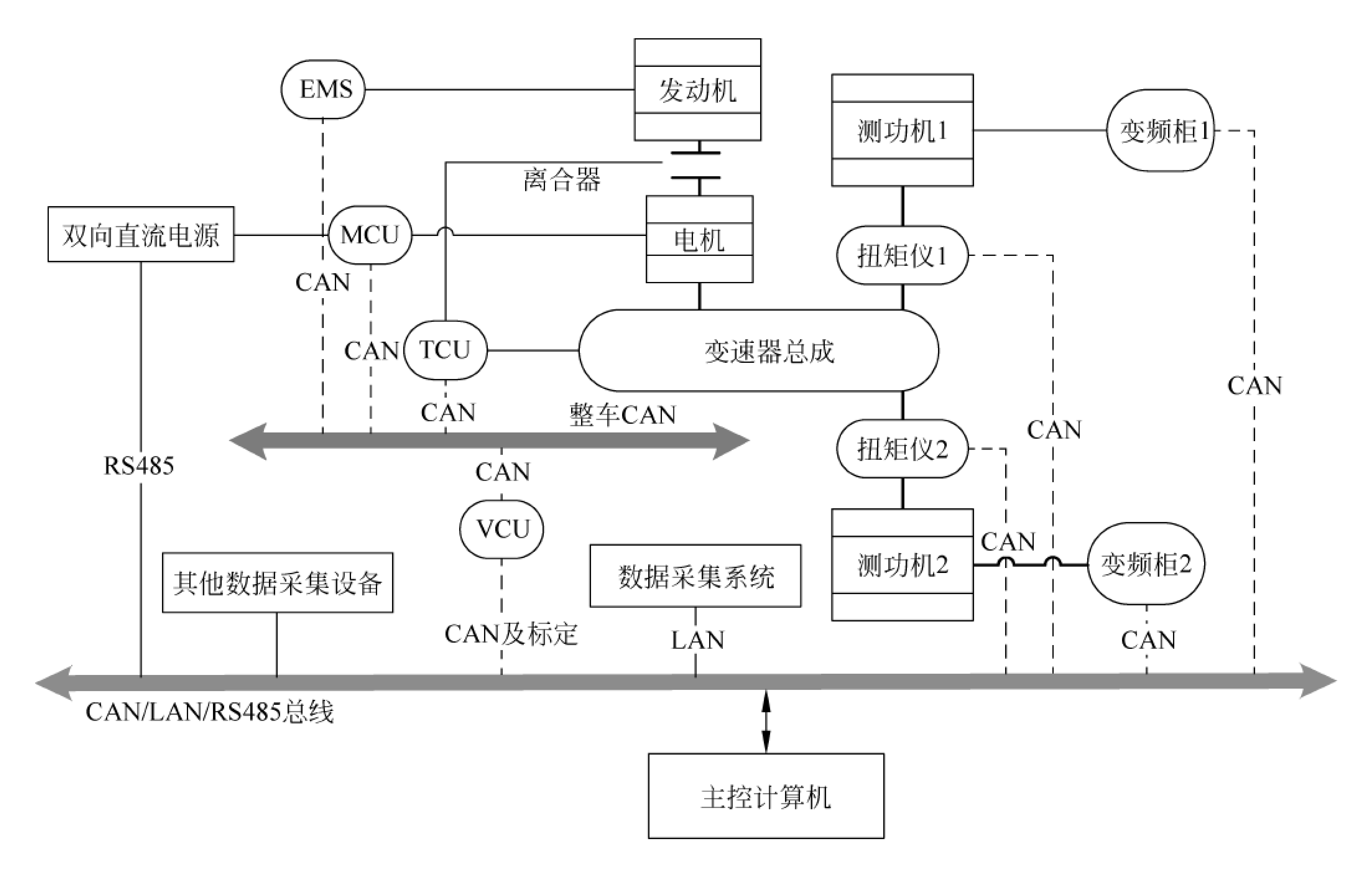


图 11-18 单轴并联式混合动力系统测试台架

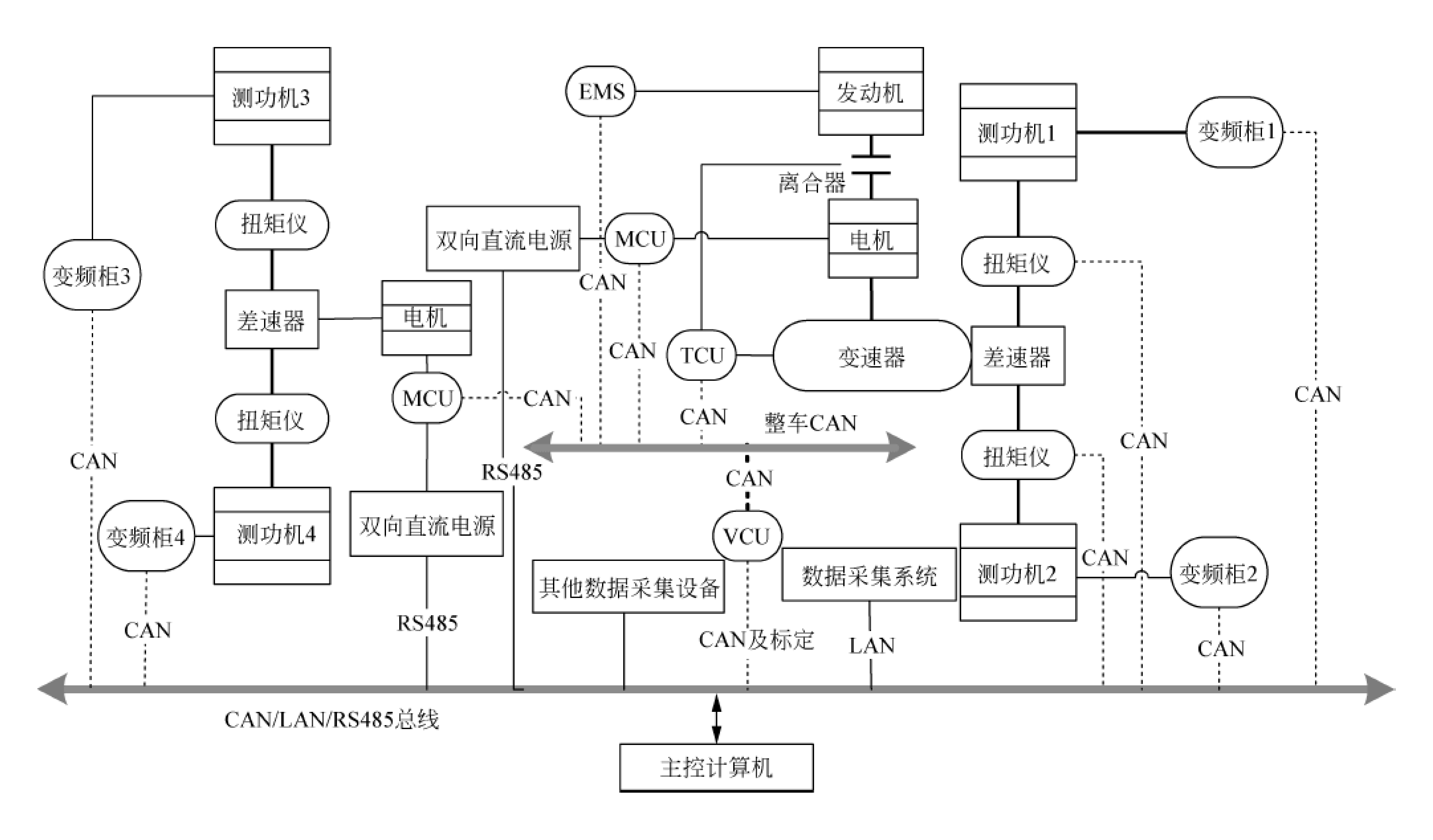


图 11-19 四驱混合动力系统测试台架结构框图

对单轴并联式混合动力系统进行道路负载模拟测试，本试验测试对象是大型客车，车重 12000 kg，车轮半径 0.5 m，主减速比 5.7，滚动摩擦系数 0.014，迎风面积 8.25 m^2，风阻系数 0.6，最大机械制动力矩为 12000 N·m，采用中国典型城市工况。试验方法如下。

(1) 整车控制器运行混合动力控制策略，测功机设置为 RG/V 模式。

(2) 载入循环工况试验，驾驶员模型通过控制油门开度跟踪设定车速，整车控制器接收到油门设定信号，根据混合动力控制策略控制各部件。

(3) 主控计算机系统记录测功机、油耗仪、排放分析仪、CAN 网络数据，循环工况结束后对测试数据进行分析处理。

混合动力总成台架试验结果曲线如图 11-20(a)、(b)所示。

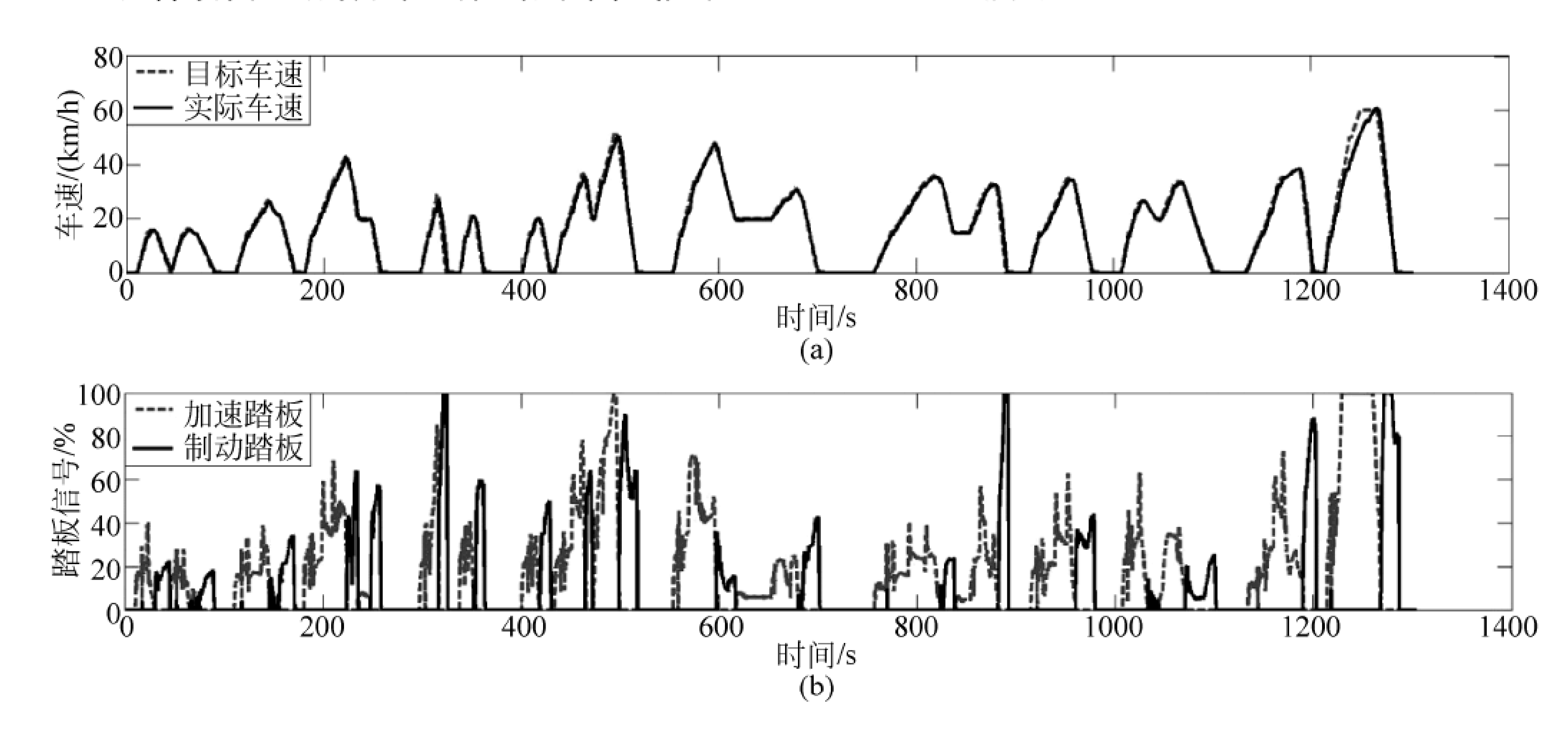


图 11-20　混合动力系统台架试验结果曲线

(a) 车速跟踪曲线；(b) 加速踏板和制动踏板曲线

参 考 文 献

[1] 叶晓，金振华，高大威，等. 测功机动态负载模拟算法[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2013(10)：1492-1497.

[2] 吴钊. 新能源汽车台架试验系统开发[D]. 北京：清华大学，2016.

[3] 王好端. 混合动力控制器集成开发平台设计及应用[D]. 北京：清华大学，2012.

[4] 徐祥. 基于 LabVIEW 的新能源混合动力总成台架控制与测试系统开发与实现[D]. 镇江：江苏大学，2014.

[5] 杨军伟. 单轴并联混合动力系统动态协调控制策略研究[D]. 北京：北京理工大学，2015.

[6] 王红岩，芮强. 基于虚拟台架的变速箱箱体动态应力测试及影响因素分析[J]. 装甲兵工程学院学报，2007，21(6)：49-53.

[7] 王欢. 基于 AVL 测功机的车用电机台架试验研究[J]. 机电工程技术，2018(2)：11-14.

[8] 刘中林.纯电动4轮独立驱动越野车试验台架的设计与实现[D].武汉：湖北大学,2013.
[9] HAKAN Z,GREG M. Dynamic Emulation of Mechanical Loads Using a Vector-Controlled Induction Motor-Generator Set[J]. IEEE Trans On Industrial Electronics,1999,46(2)：370-379.
[10] JESUS A P,GREG M. Control of an AC Dynamometer for Dynamic Emulation of Mechanical Loads With Stiff and Flexible Shafts[J]. IEEE Trans On Industrial Electronics,2006,53(4)：1250-1260.



试验指导书

试验1　汽油机速度特性试验

1.1　试验目的

（1）了解和掌握汽油机功率、转速和燃油消耗量的测量方法。

（2）理解汽油机速度特性的概念并掌握试验方法。

（3）掌握汽油机速度特性试验结果的计算整理、曲线的制作和分析方法。

（4）掌握汽油机速度特性规律及充量系数 ϕ_c随转速的变化规律。

1.2　试验要求

（1）试验前，复习内燃机原理和构造，熟悉和掌握与本试验内容相关的内燃机性能指标。

（2）认真阅读本书的第1章、第2章和第3章，了解试验设备的原理及试验的基本条件。

（3）试验中，按指导教师的要求操作仪器设备，正确观测和记录数据，按步骤进行试验。

（4）试验后要求认真撰写试验报告，正确处理试验数据并规范列出试验数据和计算结果表格，绘制有关的速度特性曲线，结合原理对试验结果和试验特性曲线进行分析与讨论。

（5）严格遵守实验室管理规章制度（安全、仪器操作、试验流程等）。

1.3　主要试验设备

（1）测功机参数与调控：测功机为GW160电涡流测功机，主要参数为最高转速8000 r/min，最大扭矩可达700 N・m，最大功率达160 kW；扭矩分辨率为±0.1 N・m，测量精度为±0.4%；转速分辨率为±1 r/min，测量精度为±5 r/min；扭矩、转速以数字的形式在控制界面上显示。负载系统的控制工作方式有6种控制模式：

① 恒扭矩/恒转速控制（M/n）；

② 恒转速/恒扭矩控制（n/M）；

③ 恒扭矩/恒油门位置控制（M/P）；

④ 恒转速/恒油门位置控制(n/P);

⑤ 恒调节阀(励磁)位置/恒油门位置控制(P_1/P),此种模式为手动控制,无反馈调整;

⑥ 推进特性控制(M/n^2),此种模式按船舶螺旋桨扭矩公式 $M \propto n^2$ 来调控。

(2) 油耗仪参数:用日本小野公司生产的 DF-312 容积式油耗仪,测量汽油机燃料消耗量;油耗分辨率为±0.1 mL,时间分辨率为±0.1 s,测量精度为±0.5%。

(3) 气体质量流量计参数:用上海同圆公司生产的 ToCeiL 热膜式气体质量流量计,测量汽油机进气空气消耗量;最大测量流量为 600 kg/h,分辨率为±0.1 kg/h,测量精度为±1%。

1.4 汽油机台架系统装置

汽油机台架试验系统,如图 A1-1 所示。

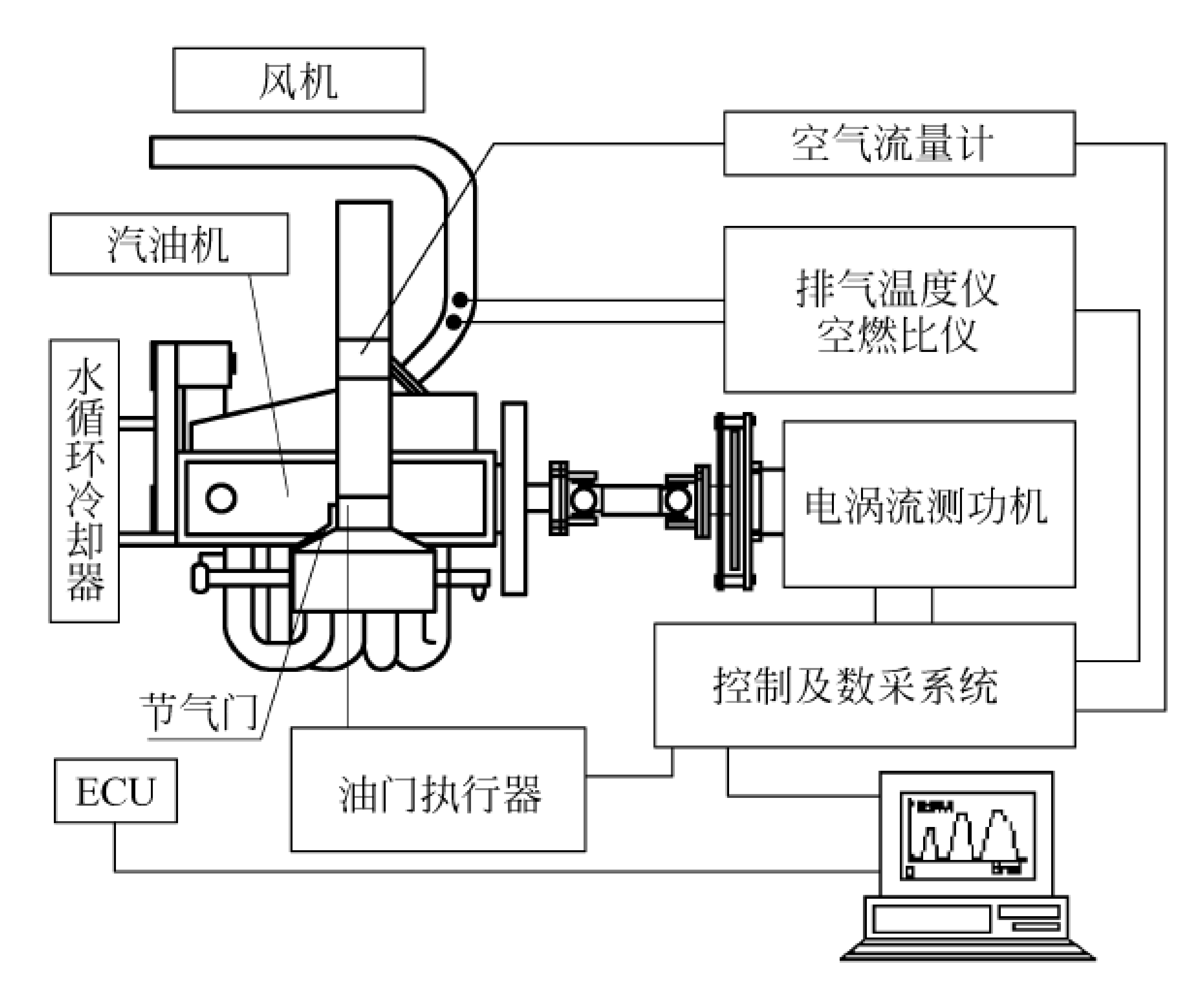


图 A1-1 汽油机台架试验系统

1.5 试验对象、燃料

(1) 试验对象:试验用多点电控喷射汽油机,参数种类如表 A1-1 所示(具体参数值根据实际试验对象填写)。

表 A1-1 多点电控喷射汽油机参数

汽油机形式			
汽油机型号		点火顺序	
缸径×行程/mm		怠速/(r/min)	
总排量/L		整机净质量/kg	
压缩比		外形,长×宽×高/(mm×mm×mm)	
额定功率(kW)/转速(r/min)		曲柄长度/mm	
最大扭矩(N·m)/转速(r/min)		连杆长度/mm	
最低燃油消耗率/(g/(kW·h))		燃料及标号	

(2) 试验用燃料：详细参数种类如表 A1-2 所示。

表 A1-2　燃料参数

汽油编号	辛烷值	铅含量/(mg/L)	硫含量/(mg/L)	燃油低热值/(kJ/kg)	密度(20℃)/(kg/m^3)	碳氢比

1.6　试验标准及方法

1. 试验标准

汽油机试验条件，按国家标准 GB/T 18297—2001《汽车发动机性能试验方法》的规定进行控制。测量仪表精度及测量部位应符合 GB/T 18297—2001 的规定。

2. 试验方法

(1) 按国家标准 GB/T 18297—2001《汽车发动机性能试验方法》进行。

(2) 进行测量数据时，汽油机运行转速与选定转速相差不应超过 1%或±10 r/min，汽油机运行状态稳定 1 min 后，方可进行试验测量。

(3) 进行速度特性试验时，从高速开始逐渐降低汽油机转速进行试验测量。

(4) 试验过程中，保持节气门开度不变，缓慢调节负荷以达到所选定转速的工况点，稳定后进行试验。

(5) 试验中燃油消耗量的测量方法在第 2 章中已有介绍。因汽油机的燃油易挥发，所以一般用容积法测量燃油消耗量。为保证测量结果的准确性，相同的工况最少测量 3 次，以其平均值作为该工况的燃油消耗量数据。

(6) 试验中空气消耗量测量时：由于汽油机进气具有脉动效应，因此从二次仪表中应读取波动的最大值和最小值，其平均值即为该工况的空气消耗量数值，单位为 kg/h。每一工况要求至少测量两次，求其平均值为该工况的测量数据。

(7) 试验分工：根据参加的人数(6 人左右)分 3 个小组，第 1 小组负责汽油机控制台的操作，并检查每一工作的配合次序；第 2 小组负责记录功率、转速、扭矩、水温、油温、排温、大气压、大气温度及湿度等参数；第 3 小组负责燃油消耗量、空气消耗量的测量与记录，同时汇总填写试验数据原始记录表格。条件允许时，各小组的任务可相应轮换。

1.7　试验步骤及内容

(1) 检查汽油机安装是否正确、安全、可靠。打开燃油开关、冷却水阀门及各测试系统开关，如汽油机测控仪等，起动汽油机，检查运转时有无明显的不稳定现象。无问题则进行汽油机预热及试验前的其他准备工作。

(2) 当汽油机达到预热要求后，选取规定的油门位置(如 x%、100%)，开始进行汽油机速度特性试验，每次试验适当选择 8 个以上的测量点。试验中汽油机采用测功机恒转速、调

节油门方式(n/P)。

① 速度特性试验——部分油门位置：本次试验的节气门开度(TPS)定为 $xx\%$。试验点转速由高到低，依次为 xx、xx、……(r/min)8 个测量点。试验测量数据记录表格，如表 A1-3 所示。

表 A1-3 汽油机速度特性试验——试验数据记录表格

试验名称：汽油机 $x\%$ 节气门开度的速度特性								
试验日期		时间		地点		汽油机型号		
燃油编号			密度/(kg/m³)			试验人员		
大气压力/kPa			大气温度/℃					
序号	转速 n /(r/min)	扭矩 M_e /(N·m)	油耗 /(L/h)	$P_{机油压}$ /kPa	$T_{机油温}$ /℃	$T_{出水温}$ /℃	进气量 G_a /(kg/h)	空燃比 A/F
1								
序号	$T_{排气温}$ /℃	$T_{进气温}$ /℃	湿度 /%	$P_{0大气压力}$ /kPa	修正系数 /%	功率 P_e /kW	比油耗 g_e /(g/(kW·h))	充气系数 ϕ_c /%
1								

② 速度特性试验——全油门位置即外特性：节气门开度 100%。试验点转速由高到低，依次选 8 个测量点。试验测量数据记录表格，如表 A1-4 所示。

表 A1-4 汽油机外特性试验——试验数据记录表格

试验名称：汽油机 100%节气门开度的速度特性——外特性								
试验日期		时间		地点		汽油机型号		
燃油编号			密度/(kg/m³)			试验人员		
大气压力/kPa			大气温度/℃					
序号	转速 n /(r/min)	扭矩 M_e /(N·m)	油耗 /(L/h)	$P_{机油压}$ /kPa	$T_{机油温}$ /℃	$T_{出水温}$ /℃	$T_{排气温}$ /℃	空燃比 A/F
1								
序号	进气量 G_a /(kg/h)	$T_{进气温}$ /℃	湿度 /%	$P_{0大气压力}$ /kPa	修正系数 /%	功率 P_e /kW	比油耗 g_e /(g/(kW·h))	充气系数 ϕ_c /%
1								

(3) 试验过程中同步绘制性能的监督曲线，主要有扭矩、空燃比、比油耗随转速变化曲线，通过曲线的变化规律初步判断试验是否正确，以决定试验是否补点或重做。

1.8 试验数据整理及总结分析要求

(1) 按表 A1-3、表 A1-4 填写试验结果和计算数据表格。

(2) 在同一坐标图上画出速度特性试验 1(部分油门位置)和速度特性试验 2(全油门位置即外特性)的性能对比曲线—— M_e-n、P_e-n、g_e-n、A/F-n、G_a-n、$T_{排气温}$-n、ϕ_c-n 等特性对比曲线图。例见图 A1-2～图 A1-8。

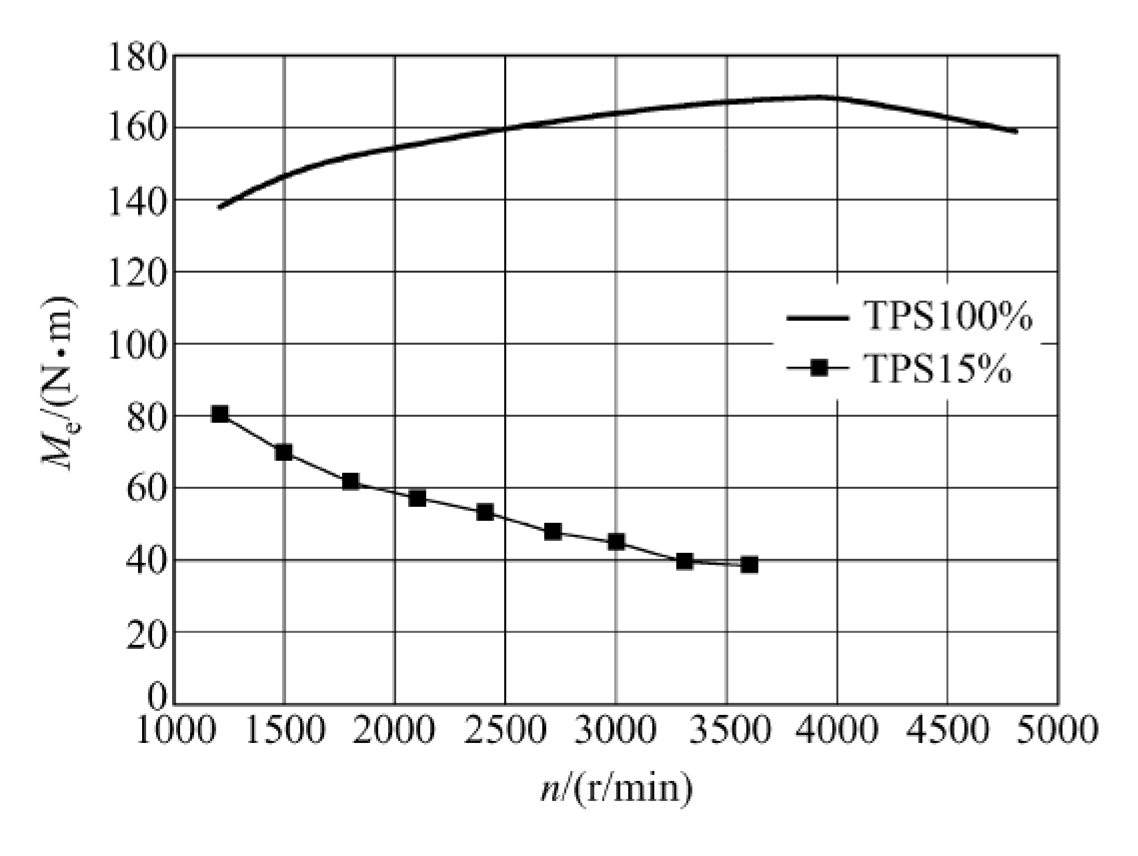


图 A1-2　转速-扭矩对比曲线

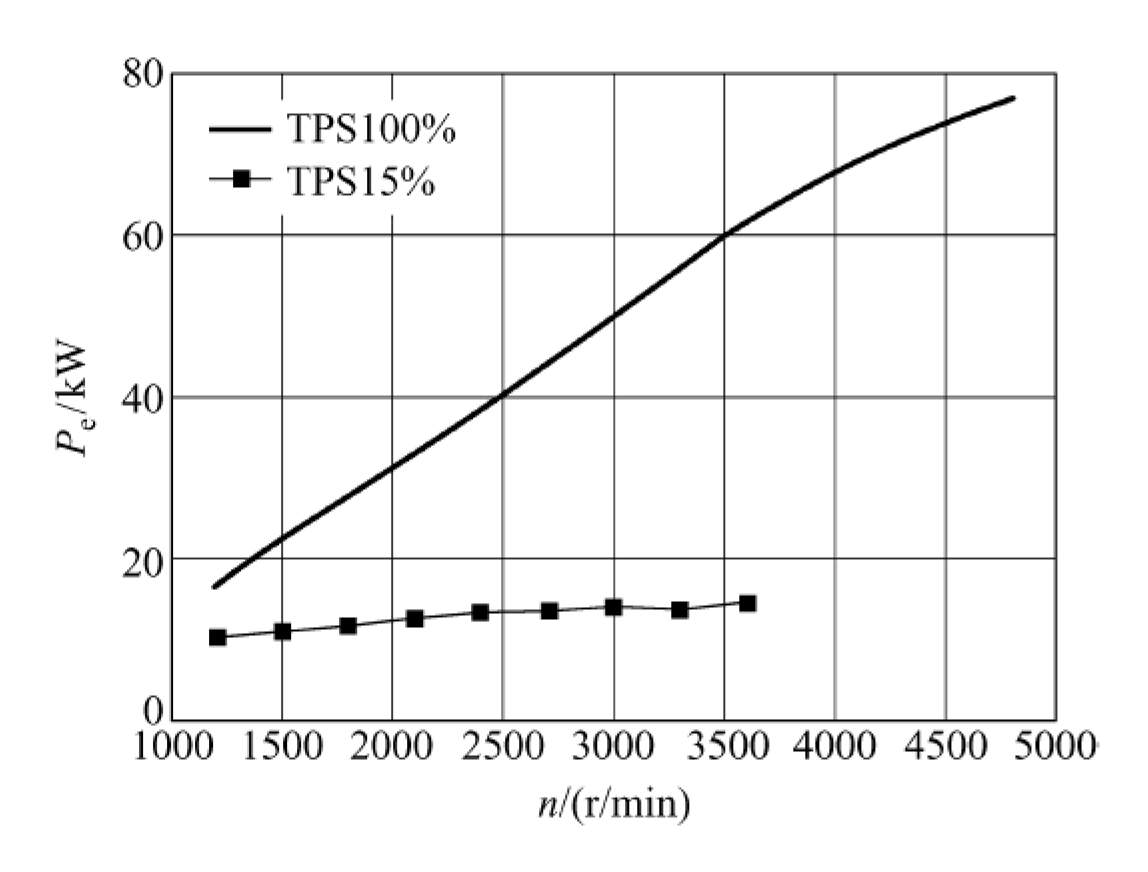


图 A1-3　转速-功率对比曲线

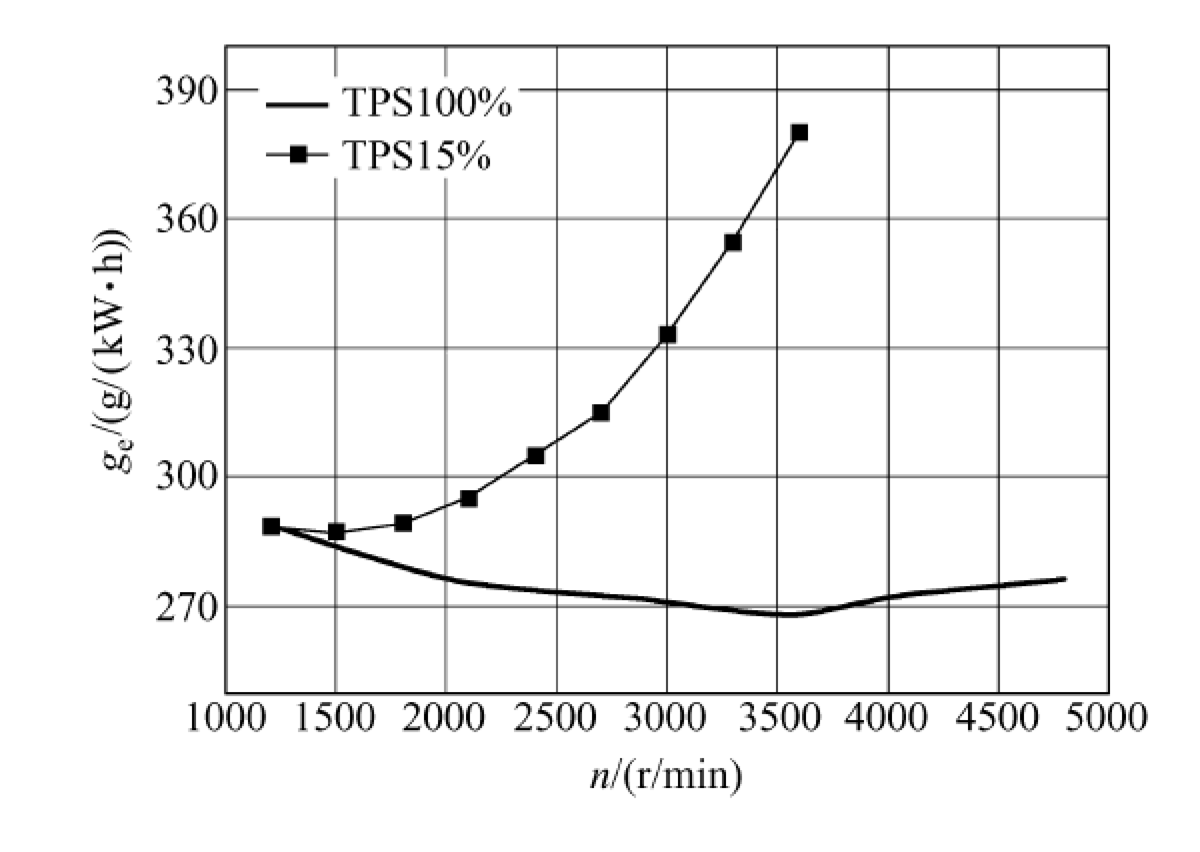


图 A1-4　转速-燃油消耗率对比曲线

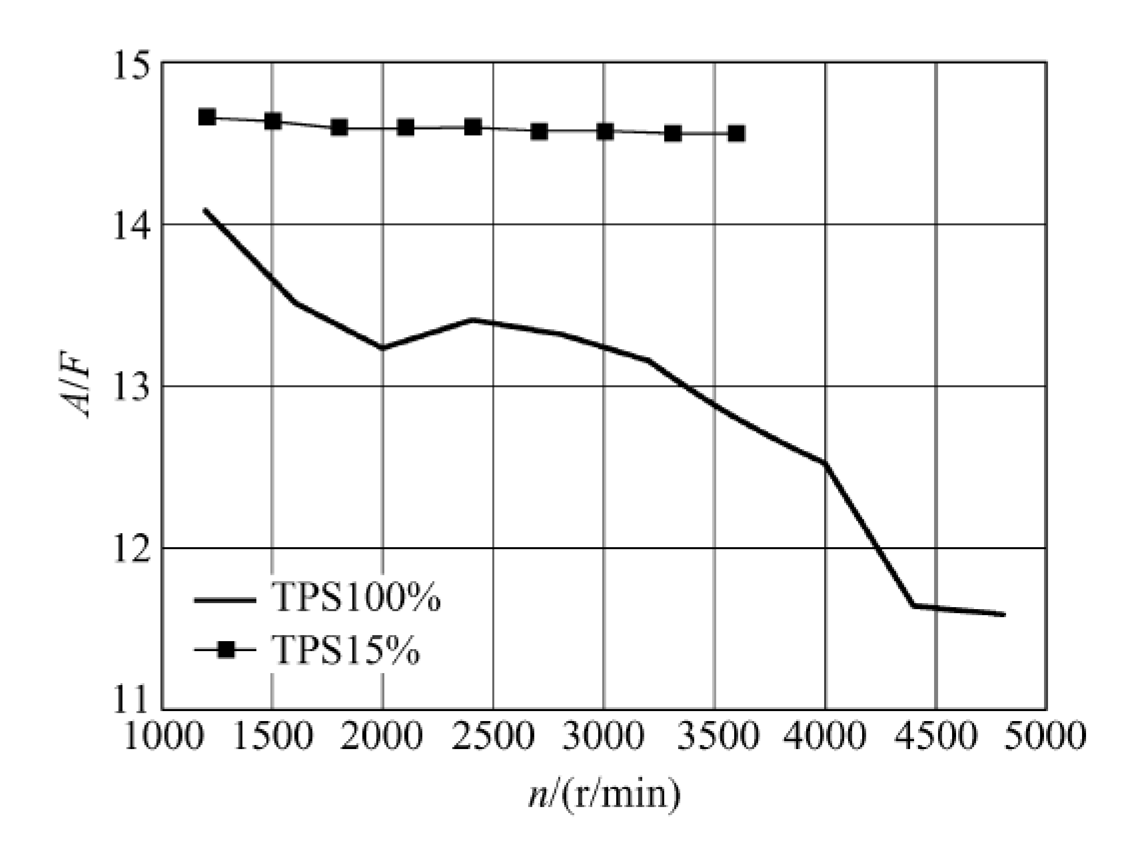


图 A1-5 转速-空燃比对比曲线

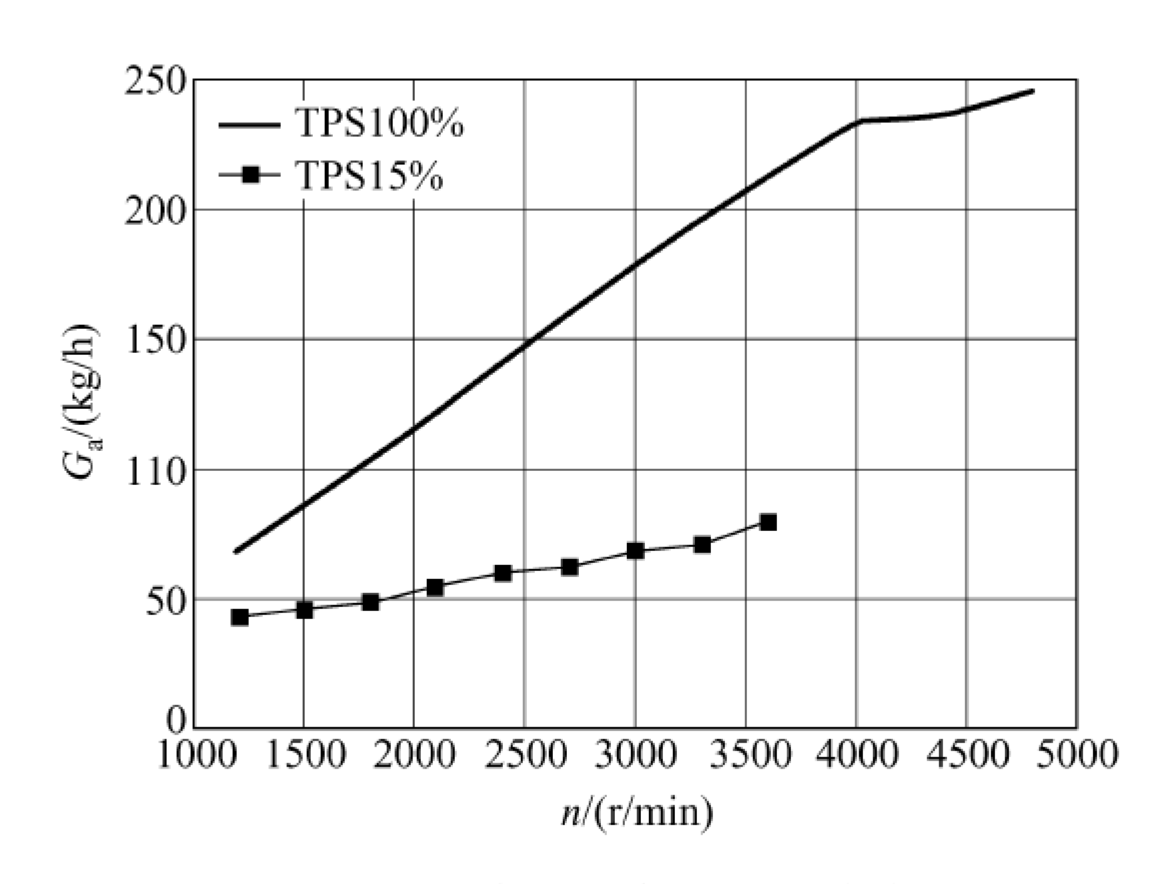


图 A1-6 转速-进气量对比曲线

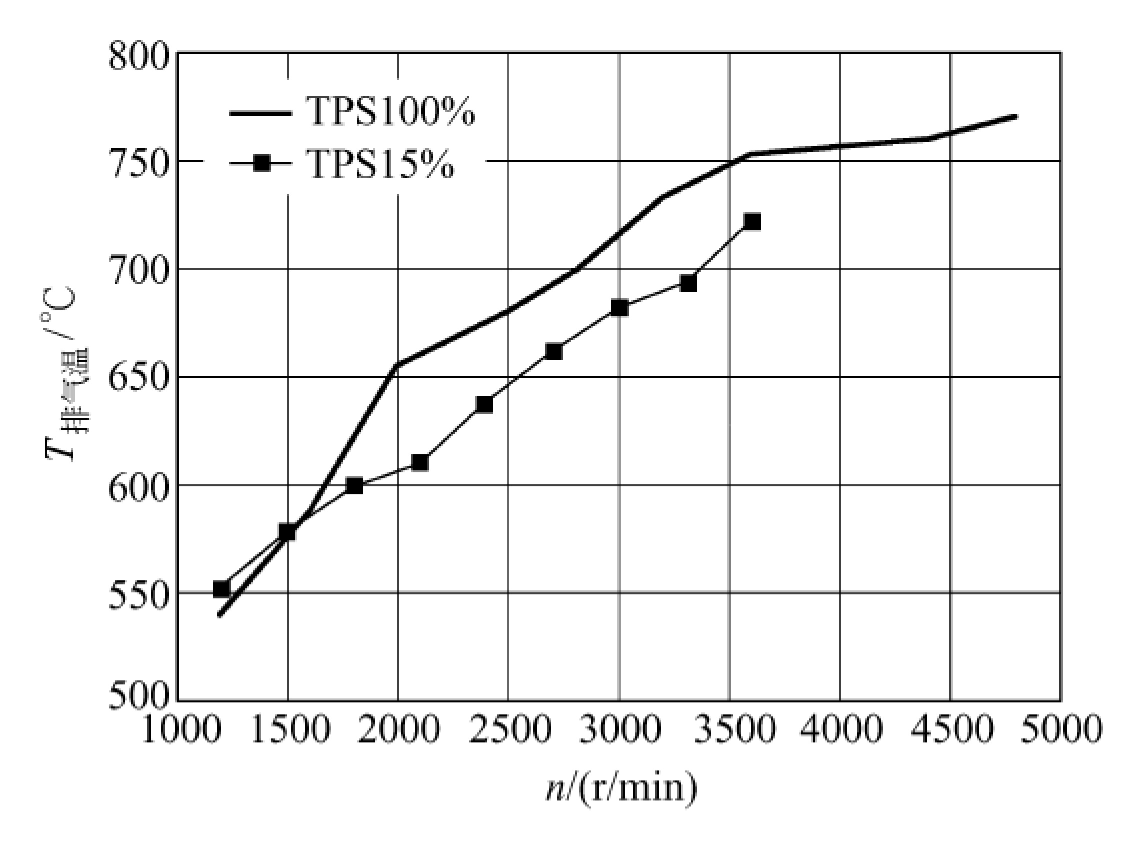


图 A1-7 转速-排气温度对比曲线

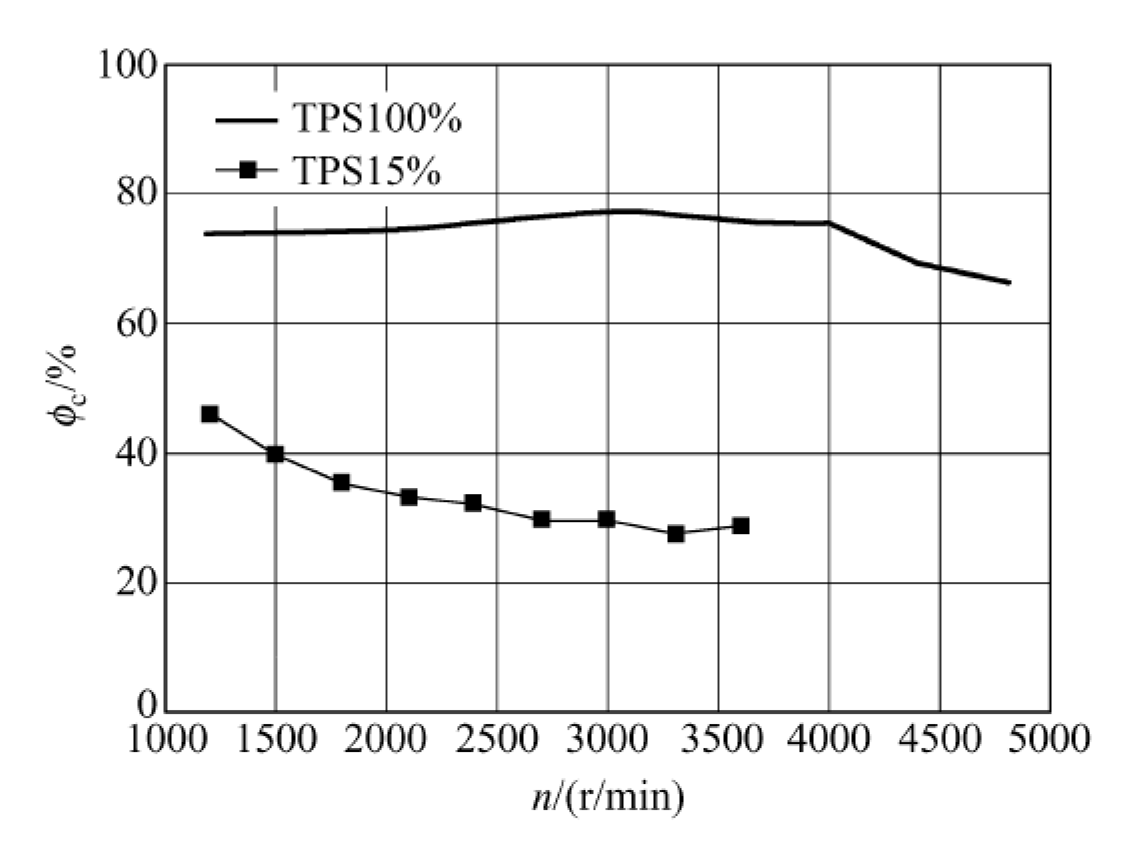


图 A1-8　转速-充气系数对比曲线

(3) 对比上述性能曲线图及试验结果进行下述分析、讨论。

① 分析不同参数的部分油门的速度特性与外特性曲线的差异及原因。

② 分析充气系数与扭矩特性曲线的相互关系，进一步比较影响扭矩特性的主要因素，并进行讨论。

③ 电控汽油机部分油门的速度特性与外特性空燃比应如何控制？

④ 测定及计算汽油机的升功率、最大功率、最大扭矩以及转速和扭矩储备系数后，对汽油机的动力性能进行评价。

⑤ 讨论速度特性试验时，试验点转速应如何选择，试验顺序对试验数据结果有哪些影响。

⑥ 讨论速度特性试验时控制模式的选择是否合理，还可采用哪种模式进行试验，并分析其利弊。

⑦ 讨论试验中出现的各种异常或特殊情况，分析、探讨其原因。

试验 2　汽油机负荷特性试验

2.1　试验目的

(1) 掌握汽油机负荷特性的试验方法。

(2) 掌握汽油机负荷特性试验结果的计算整理、曲线的制作和分析方法。

2.2　试验要求

(1) 了解和掌握汽油机负荷特性的试验方法，理解负荷特性试验的目的和意义，深刻理解负荷特性试验与速度特性试验的相同点和不同点。

(2) 其余内容同试验 1 的 1.2 中(2)、(3)、(4)、(5)。

2.3 主要试验设备

内容同试验 1 的 1.3。

2.4 汽油机台架系统装置

内容同试验 1 的 1.4。

2.5 试验对象、燃料

内容同试验 1 的 1.5。

2.6 试验标准及方法

内容同试验 1 的 1.6。

2.7 试验步骤及内容

(1) 内容同试验 1 的 1.7 中(1)。

(2) 当汽油机达到预热要求后，选取某一转速、变化油门位置进行汽油机负荷特性试验，适当选择 8 个以上的测量点。试验中汽油机转速控制采用测功机恒转速、油门调节方式(n/P)和(n/M)模式结合使用*。

(3) 此次试验的负荷特性转速定为 x(r/min)，转速确定后保持转速不变，通过改变节气门位置改变汽油机负荷，逐点进行试验。负荷选择由最低扭矩值开始，依次升高，直至节气门位置最大**结束。试验中要求作出空燃比值改变的拐点。

(4) 试验时汽油机水温、机油温度应尽量保持恒定，每个试验工况点在保持稳定后，记录相关试验数据，试验数据表格如表 A2-1 所示。

(5) 试验过程中需同步绘制以扭矩、空燃比和比油耗为主要参数的性能监督曲线，从曲线中可直接看出试验过程是否异常，以决定试验是否需补点或重做。

(6) 由于时间及条件限制，每个试验小组通常只能完成 1～2 个转速点的负荷特性试验，为了更好地分析被测汽油机性能，编写试验总结报告时，可用其他组的试验数据进行综合分析。

2.8 试验数据整理及总结分析要求

(1) 将试验测试结果和计算数据填写到表 A2-1。

---

* 满负荷和零负荷工况点时使用(n/P)模式，其余工况点使用(n/M)模式。

** 节气门最大位置一般指汽油机标定时额定工况点的节气门位置。为了解汽油机的最大负荷能力，若条件允许，可适当加大该节气门位置进行全负荷试验。

（2）画出负荷特性性能曲线，主要有 g_e-P_e、A/F-P_e、$T_{排气温}$-P_e、G_a-P_e 等特性曲线图，如图 A2-1～图 A2-4 所示。图 A2-1～图 A2-4 是某汽油机转速为 2800 r/min 时的负荷特性试验曲线图。

（3）根据所学汽油机原理知识，对试验结果进行分析。下面列举了若干问题，供读者参考。

① 负荷特性性能曲线呈鱼钩状的原因。

② 结合 A/F-P_e 曲线，说明曲线上各点空燃比标定的理由。进一步讨论空燃比标定值对油耗率及曲线走势的影响。

③ 结合 $T_{排气温}$-P_e 和 A/F-P_e 曲线，讨论负荷加大受限制的原因，并讨论如何根据动力、经济性的要求确定外特性的最大扭矩点、额定功率点。

（4）作出多条不同转速负荷特性曲线的充气系数曲线图，分析影响充气系数的各种主要因素，并进行讨论。

（5）利用多条不同转速负荷特性曲线，作出等比油耗及等功率的全特性曲线图，对汽油机的经济性能进行分析。

（6）讨论试验中出现的各种异常或特殊情况，分析、探讨其原因。

表 A2-1 电控汽油机转速为 x(r/min)时的负荷特性试验数据

试验名称：电控汽油机转速为 x(r/min)的负荷特性试验								
试验日期		时间		地点		汽油机型号		
燃油编号			密度/(kg/m³)			试验人员		
大气压力/kPa			大气温度/℃					
序号	转速 n /(r/min)	扭矩 M_e /(N·m)	油耗 /(L/h)	$P_{机油压}$ /kPa	$T_{机油温}$ /℃	$T_{出水温}$ /℃	进气量 G_a /(kg/h)	空燃比 A/F
1								
序号	$T_{排气温}$ /℃	$T_{进气温}$ /℃	湿度 /%	$P_{0大气压力}$ /kPa		功率 P_e /kW	比油耗 g_e /(g/(kW·h))	充气系数 ϕ_c /%
1								

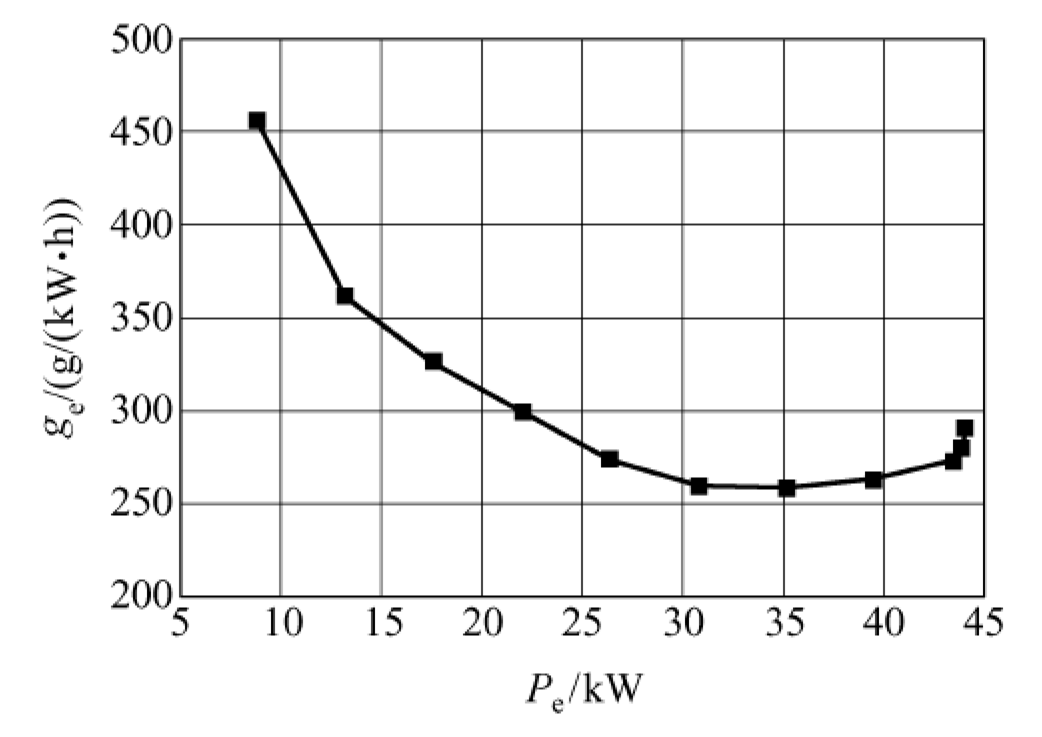


图 A2-1 2800 r/min 燃油消耗率曲线

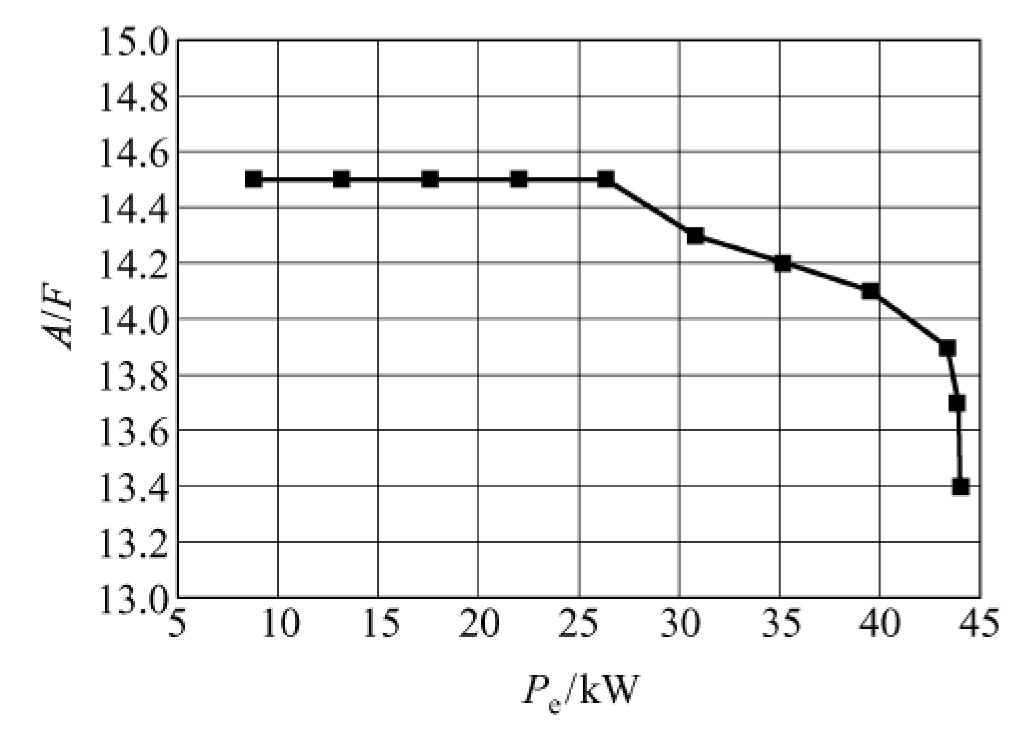


图 A2-2 2800 r/min 空燃比曲线

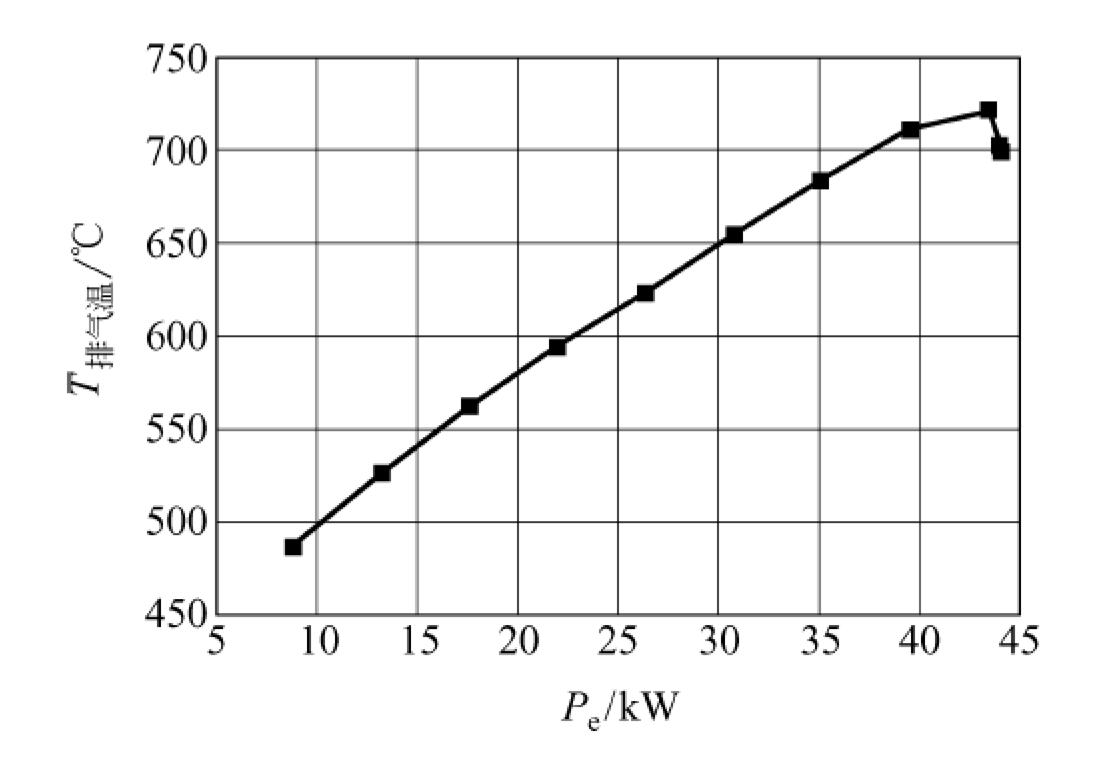


图 A2-3 2800 r/min 排气温度曲线

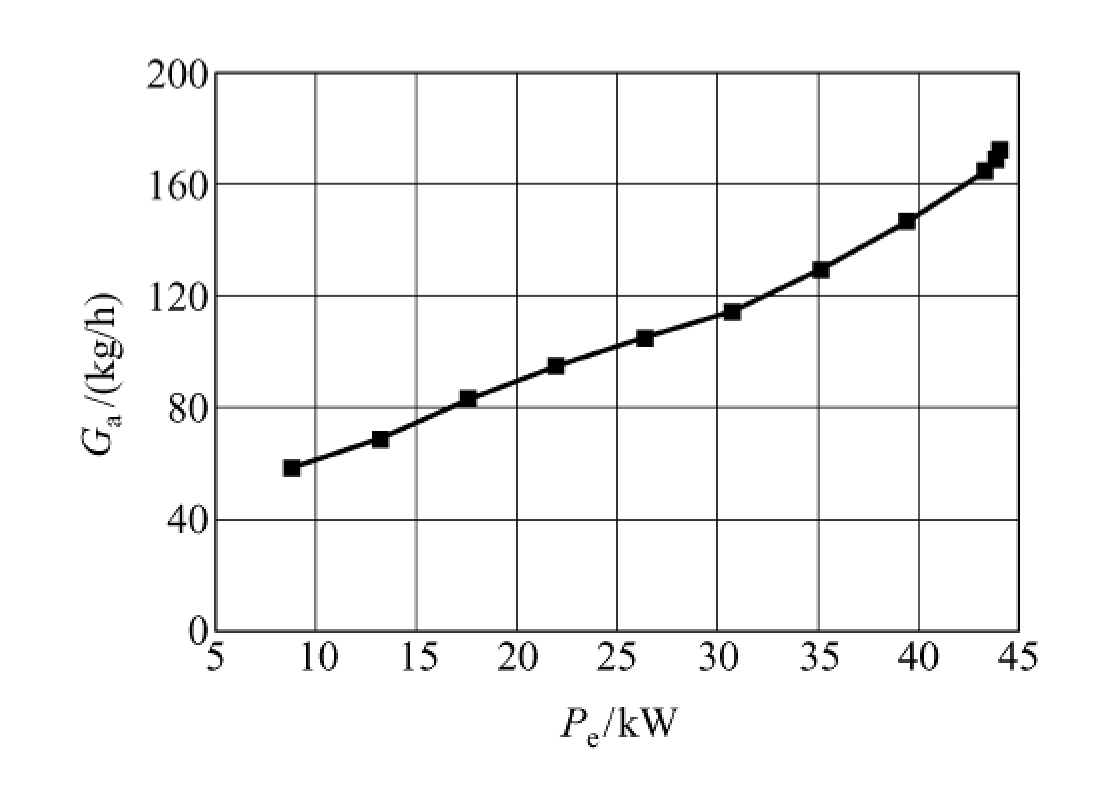


图 A2-4 2800 r/min 进气量曲线

试验 3 柴油机速度特性、负荷特性试验

3.1 试验目的

(1) 了解并熟悉柴油机台架试验的主要设备。

(2) 掌握柴油机负荷特性、速度特性的试验方法。

(3) 掌握对试验数据进行修正及分析处理的方法。

(4) 能够根据柴油机特性曲线对其性能进行分析和评价。

(5) 能够根据试验结果找出提高柴油机排放性能的主要切入点(提高要求)。

3.2 试验要求

(1) 复习柴油机的基本构造和工作原理,进而了解车用电控高压共轨喷射系统的基本构造和工作原理。

(2) 了解柴油机负荷特性及速度特性的定义、试验方法以及注意事项。

(3) 编写试验大纲。大纲主要包括:试验内容、试验步骤、需要记录的参数——环境参数、柴油机状态参数、测试参数等。试验工况的柴油机转速可在 1500~2500 r/min 范围选择。

(4) 其他同试验 1。

3.3 主要仪器设备

(1) 吸收功率设备(负载)测功机为 GW350 电涡流测功机。其主要参数为最高转速 5000 r/min,最大扭矩 1500 N·m,最大功率 350 kW。负载系统有两种工作方式,即手动控

制和自动控制。控制方式与试验 1 的 1.3 相同，有 6 种控制模式。转速、扭矩、功率、温度等值以数字的形式在面板上显示。

扭矩分辨率±0.1 N·m、测量精度±0.4%，转速分辨率±1 r/min、测量精度±5 r/min。

(2) 油耗仪参数：采用中国湘仪公司生产的重量式油耗仪，测量柴油机燃油消耗量。油耗分辨率±0.1 g、时间分辨率±0.1 s，测量精度±0.5%。

(3) 气体质量流量计参数：上海同圆公司生产的 ToCeiL 热膜式气体质量流量计，测量柴油机进气空气消耗量。最大测量流量为 1200 kg/h，分辨率为±0.1 kg/h、测量精度为±1%。

3.4 柴油机台架系统装置

柴油机台架性能试验装置简图如图 A3-1 所示。

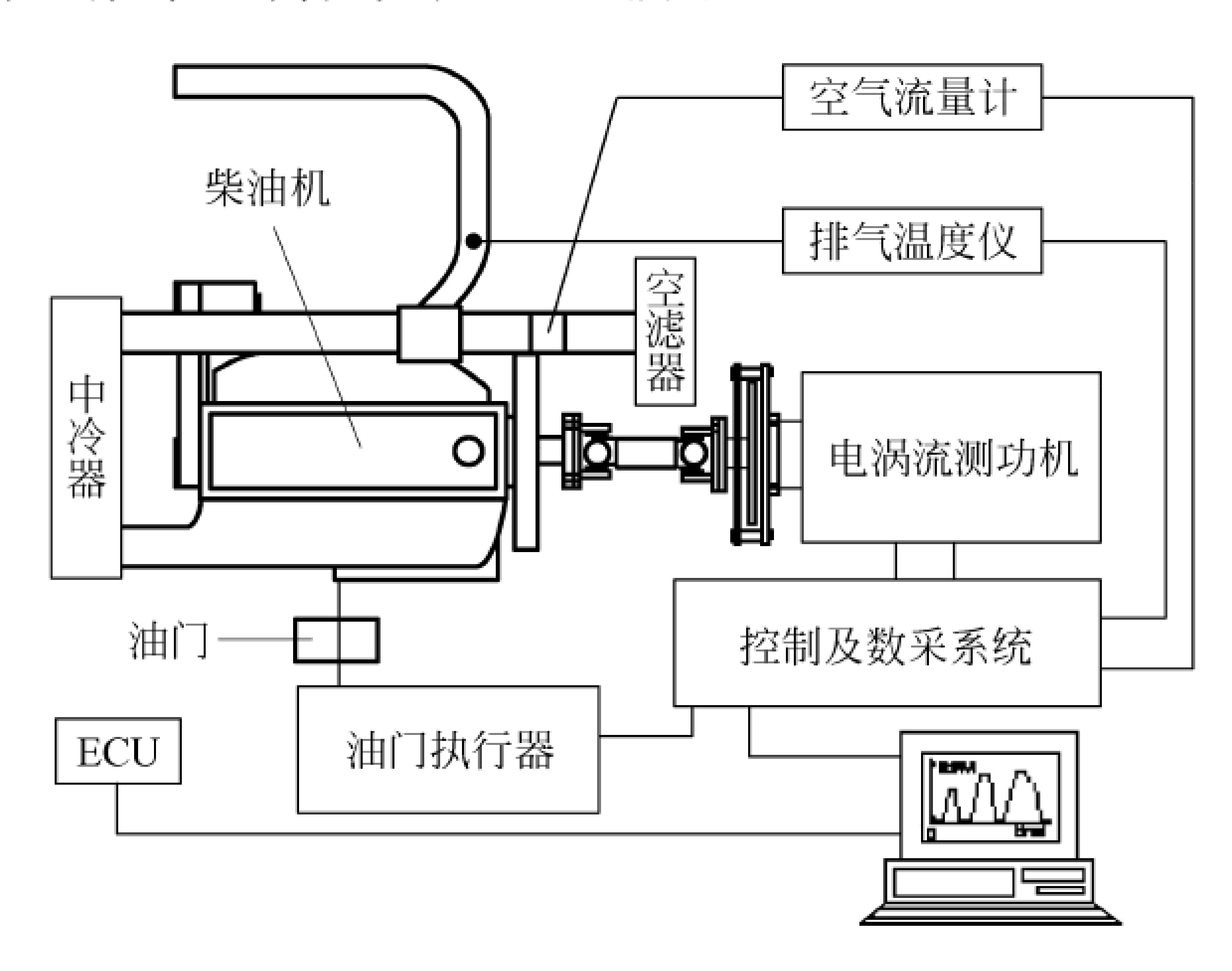


图 A3-1 柴油机台架试验装置

3.5 试验对象、燃料

(1) 试验采用车用增压中冷高压共轨直喷柴油机，需关注的主要参数如表 A3-1 所示。

表 A3-1 柴油机参数

型号		压缩比	
汽缸数		最大功率(kW)/转速(r/min)	
缸径×行程/(mm×mm)		最大扭矩(N·m)/转速(r/min)	
总排量/L		进气系统	
燃油供给系统			

(2) 试验用柴油,主要参数种类见表 A3-2。

表 A3-2 试验用柴油的主要参数

柴油编号					
T50/℃		硫含量/10^{-6}		总芳烃	
T90/℃		十六烷值		多环芳烃	
终馏点/℃		十六烷指数		密度(20℃)/(kg/m^3)	

3.6 试验注意事项

(1) 安全注意事项:需遵守试验室安全规定,听从指导教师的安排;未经允许不得擅动试验室的设备和各种电源开关;试验前认真检查柴油机和测功机的水、电、油、气等是否满足试验要求;试验过程中不得随意进入试验区,不得进入柴油机旋转区域!

(2) 试验前的安全检查:检查柴油机与测功机的连接是否安全可靠;检查旋转件防护装置是否到位;检查柴油机安装支架是否牢固;检查柴油机及测功机上是否有散落的零件或其他杂物;检查是否有其他不符合安全规定的情况。

(3) 试验准备:明确任务分工;开启燃油油路阀门;开启试验室通风换气设备;开启测功机控制系统;柴油机控制系统上电;起动并预热柴油机;准备好试验记录表;记录环境参数等。

(4) 每组至少有一名同学自带坐标纸、铅笔、直尺、橡皮等作图工具,用以制作监控曲线。

3.7 试验方法

1. 负荷特性

根据试验用柴油机的具体情况,在柴油机的额定扭矩区域选取试验转速。通常情况下,所选取的转速尽可能取整,即试验转速为 50 或 100 的整数倍。

进行负荷特性试验时,一般从小负荷开始,逐步增大负荷至满负荷,整个试验需要选取 8 个以上的测试点,并尽可能包括典型工况点,例如 25%、50%、75%等负荷点,且必须包括额定负荷点。

在进行负荷特性试验时,由于柴油机转速不变,改变柴油机扭矩,因此可以采取恒转速/恒扭矩控制模式,即 n/M 控制模式。

图 A3-2 为某柴油机的一条负荷特性曲线图。

2. 速度特性

根据柴油机实际状态,选取一定的油门开度进行,具体方法同试验 1 中的 1.6。

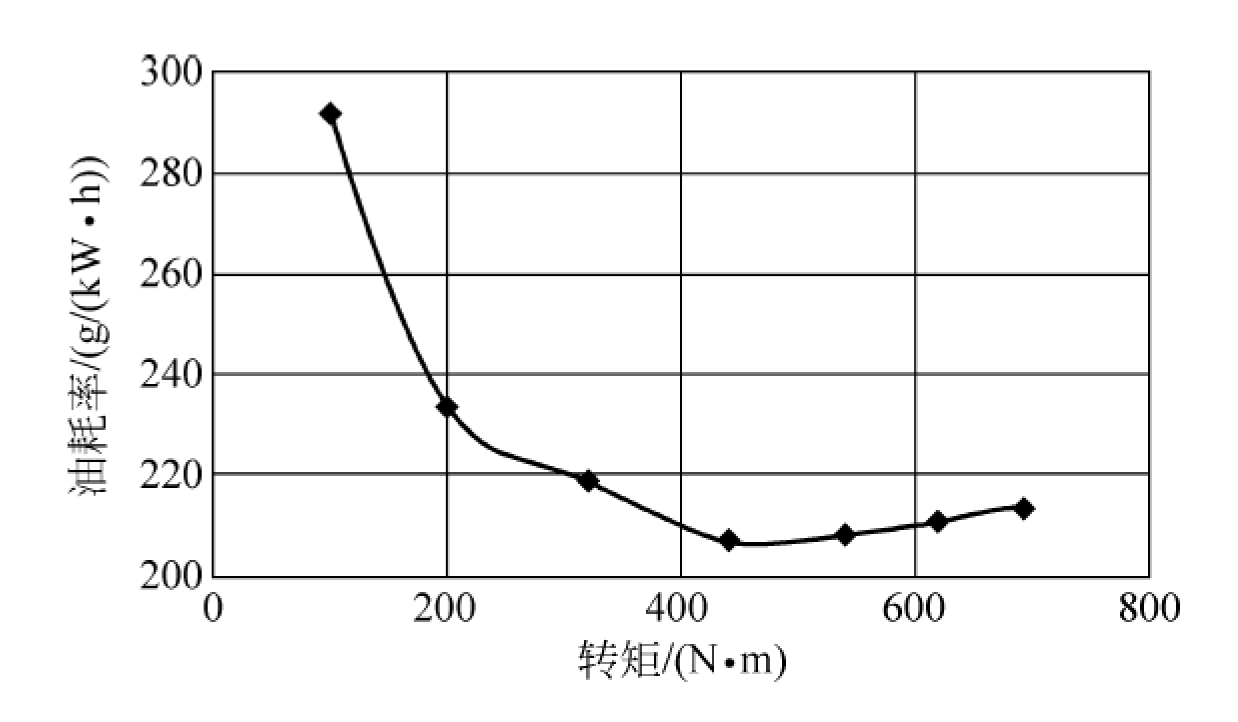


图 A3-2　某柴油机的一条负荷特性曲线

3. 试验数据测量及修正

试验过程中，需关注柴油机水温、机油温度。并应尽量保持恒定，且在每个试验工况保持稳定后，记录试验数据。由于柴油机试验并非是在标准状态下进行的，因此需要对试验过程中所采集的数据进行修正。具体的修正方法参见第 4 章或国家标准 GB/T 18297—2001。

3.8　试验内容

(1) 按照已制订的试验方案，在 1500～2500 r/min 之间选择两个试验转速进行负荷特性试验。注意负荷点选取的合理性，最低负荷一般不低于 10%。且试验工况点至少 8 个或根据需要增加试验工况点。

(2) 按照已制订的试验方案，在 40%～75%油门之间选择两个油门开度进行速度特性试验。注意工况点选取的均匀性，且试验点至少 8 个或根据需要增加试验工况点。

3.9　试验数据记录

参加试验的同学以试验小组为单位，每组自行制订试验记录表格(提示：记录表的内容至少包括试验名称，试验时间，试验地点，参加试验人员，大气温度、压力、湿度等环境参数，转速、扭矩等工况参数，油温、油压、水温等柴油机热状态参数，燃油消耗量和排放等需要测量的参数)。表 A3-3、表 A3-4 仅供参考。

表 A3-3　柴油机速度特性试验数据

<table>
<tr><td colspan="5">试验名称：柴油机油门开度 x(%)的速度特性试验</td></tr>
<tr><td>试验日期</td><td colspan="2">时间</td><td>地点</td><td>柴油机型号</td></tr>
<tr><td colspan="2">燃油编号</td><td colspan="2">密度/(kg/m³)</td><td rowspan="2">试验人员</td></tr>
<tr><td colspan="2">大气压力/kPa</td><td colspan="2">大气温度/℃</td></tr>
</table>

续表

序号	转速 n /(r/min)	扭矩 M_e /(N·m)	油耗 /(L/h)	$P_{机油压}$ /kPa	$T_{机油温}$ /℃	$T_{出水温}$ /℃	进气量 G_a /(kg/h)	空燃比 A/F
1								
序号	$T_{进气温}$ /℃	$T_{排气温}$ /℃	湿度 /%	$P_{0大气压力}$ /kPa	修正系数 /%	功率 P_e /kW	比油耗 g_e /(g/(kW·h))	充气系数 ϕ_c /%
1								

表 A3-4 柴油机负荷特性试验数据

<table>
<tr><td colspan="9">试验名称：柴油机转速 x(r/min)的负荷特性试验</td></tr>
<tr><td colspan="2">试验日期</td><td colspan="2">时间</td><td colspan="2">地点</td><td colspan="3">柴油机型号</td></tr>
<tr><td colspan="3">燃油编号</td><td colspan="3">密度/(kg/m³)</td><td colspan="3" rowspan="2">试验人员</td></tr>
<tr><td colspan="3">大气压力/kPa</td><td colspan="3">大气温度/℃</td></tr>
<tr><td>序号</td><td>转速 n /(r/min)</td><td>扭矩 M_e /(N·m)</td><td>油耗 /(L/h)</td><td>$P_{机油压}$ /kPa</td><td>$T_{机油温}$ /℃</td><td>$T_{出水温}$ /℃</td><td>$T_{排气温}$ /℃</td><td>$T_{进气温}$ /℃</td></tr>
<tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>序号</td><td>进气量 G_a /(kg/h)</td><td>空燃比 A/F</td><td>湿度 /%</td><td>$P_{0大气压力}$ /kPa</td><td>$T_{进气温}$ /℃</td><td>功率 P_e /kW</td><td>比油耗 g_e /(g/(kW·h))</td><td>充气系数 ϕ_c /%</td></tr>
<tr><td>1</td><td colspan="8"></td></tr>
</table>

试验过程中需根据测量数据同步绘制主要性能的监督曲线，如扭矩与比油耗或空燃比关系曲线。该曲线可直接反映试验是否异常，以决定试验是否补点或重做。

为全面分析柴油机特性，需要做多个负荷特性或速度特性试验。由于时间关系，每组仅能完成部分速度特性和负荷特性试验。总结时，各组可结合其他组试验数据进行综合分析，在此基础上与汽油机进行对比分析。

3.10 试验报告要求

(1) 按指导教师要求编写试验报告。

(2) 报告格式可参阅第 1 章。

(3) 图 A3-3～图 A3-10 是某柴油机外特性及转速为 1250 r/min 时的负荷特性试验曲线图，供读者参考。

（4）根据所学内燃机原理知识，对试验结果进行分析。下面列举了若干问题，供读者参考。

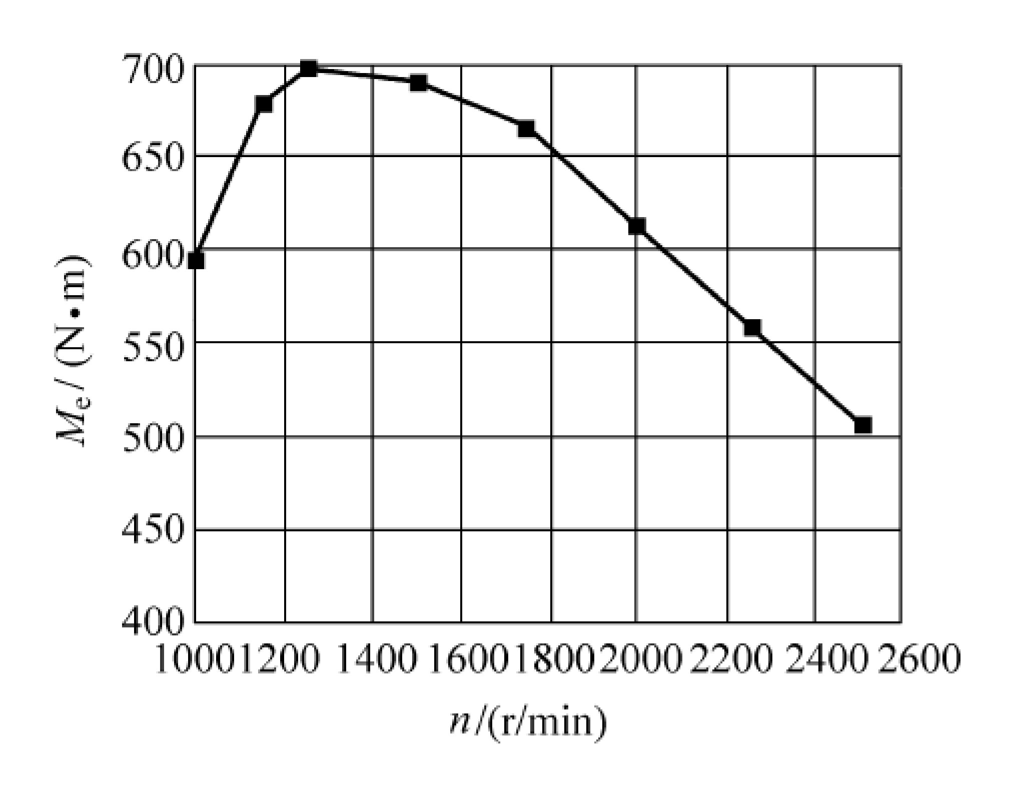


图 A3-3　外特性扭矩曲线

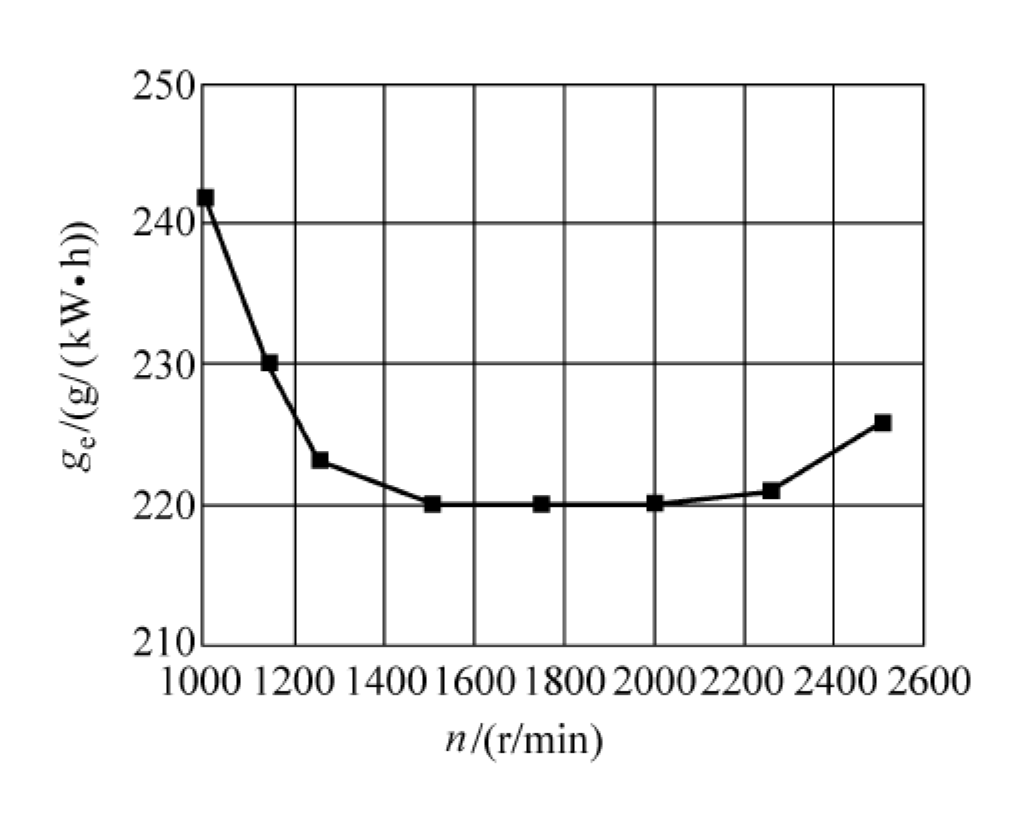


图 A3-4　外特性燃油消耗率曲线

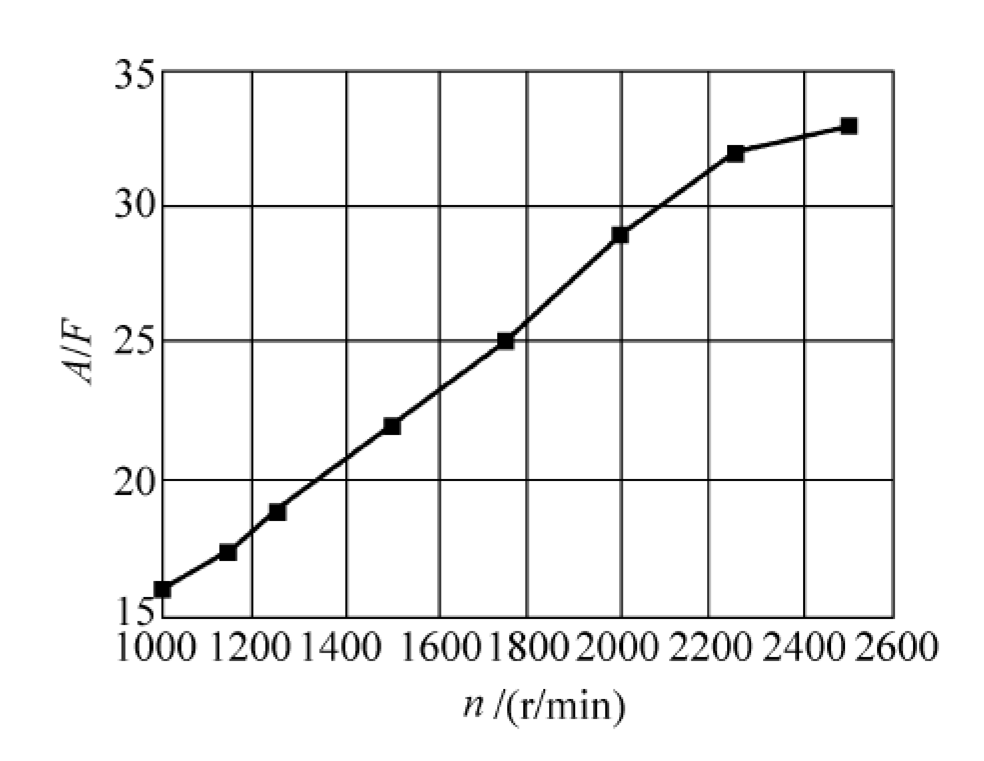


图 A3-5　外特性空燃比曲线

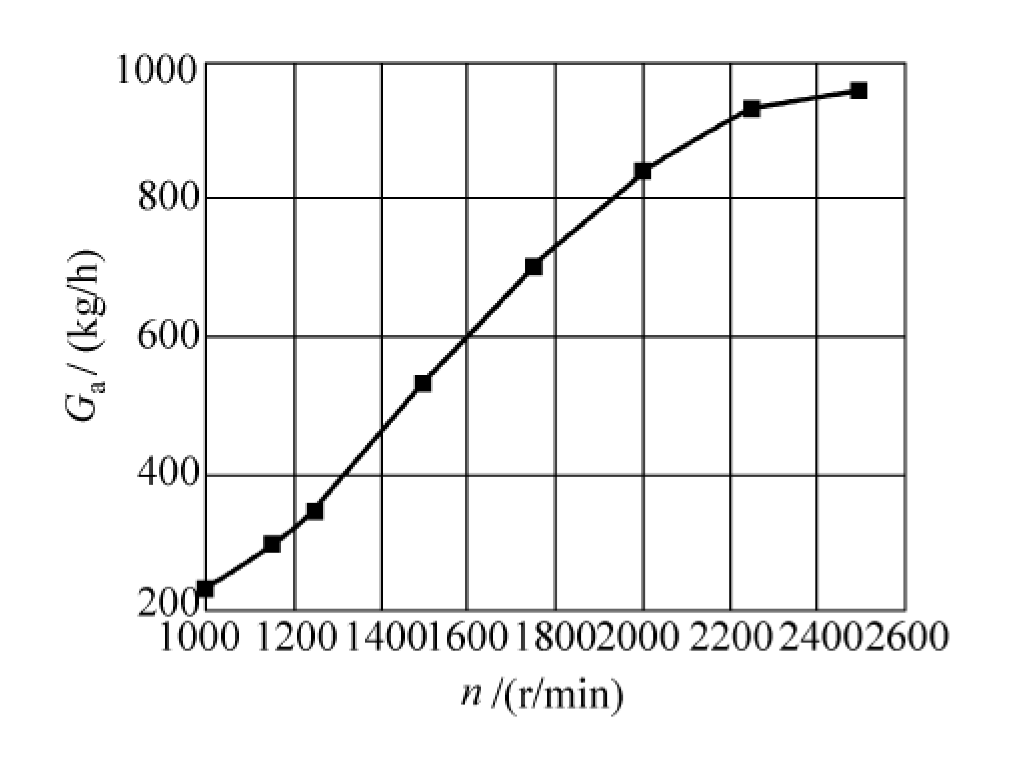


图 A3-6　外特性进气量曲线

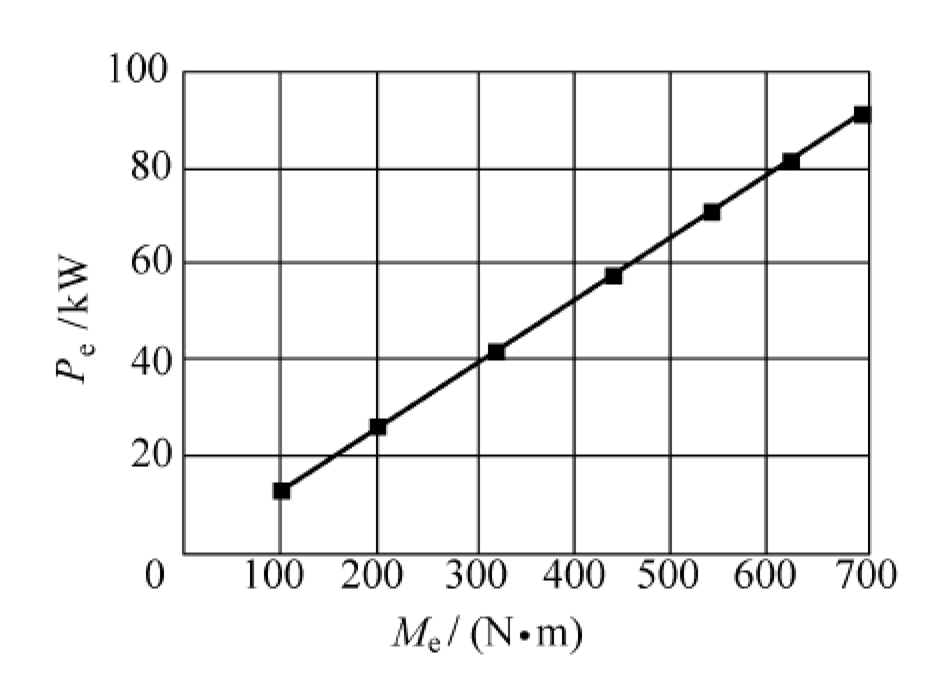


图 A3-7　1250 r/min 功率曲线

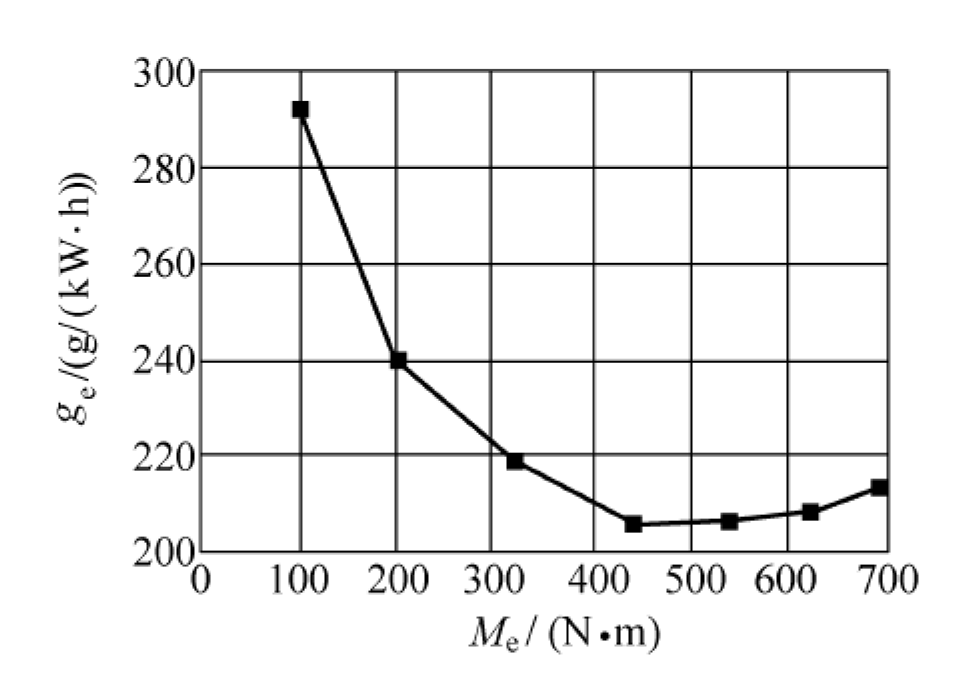


图 A3-8　1250 r/min 燃油消耗率曲线

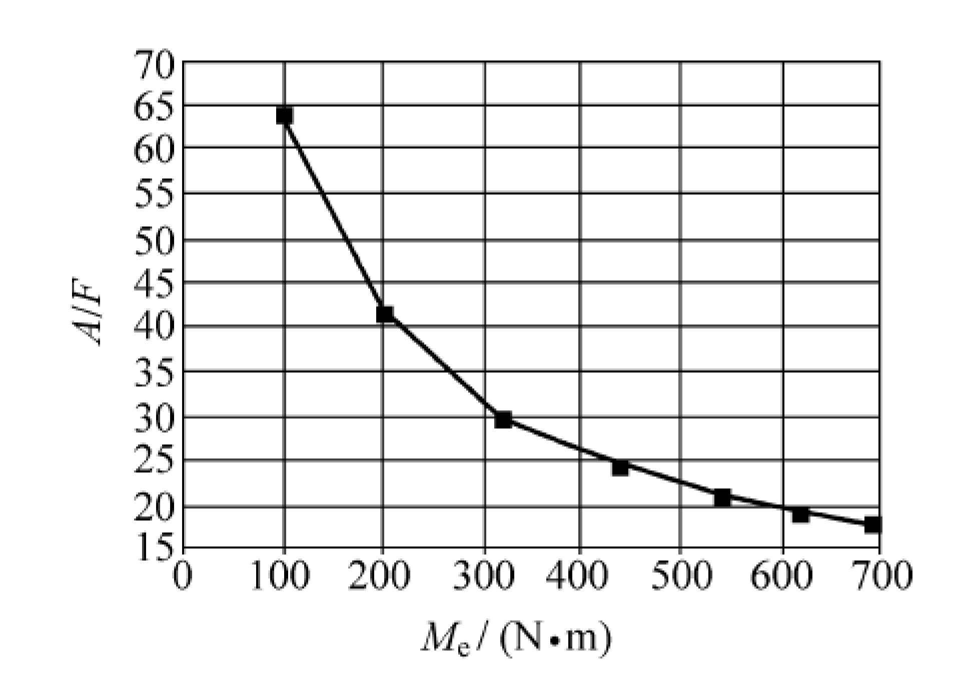


图 A3-9　1250 r/min 空燃比曲线

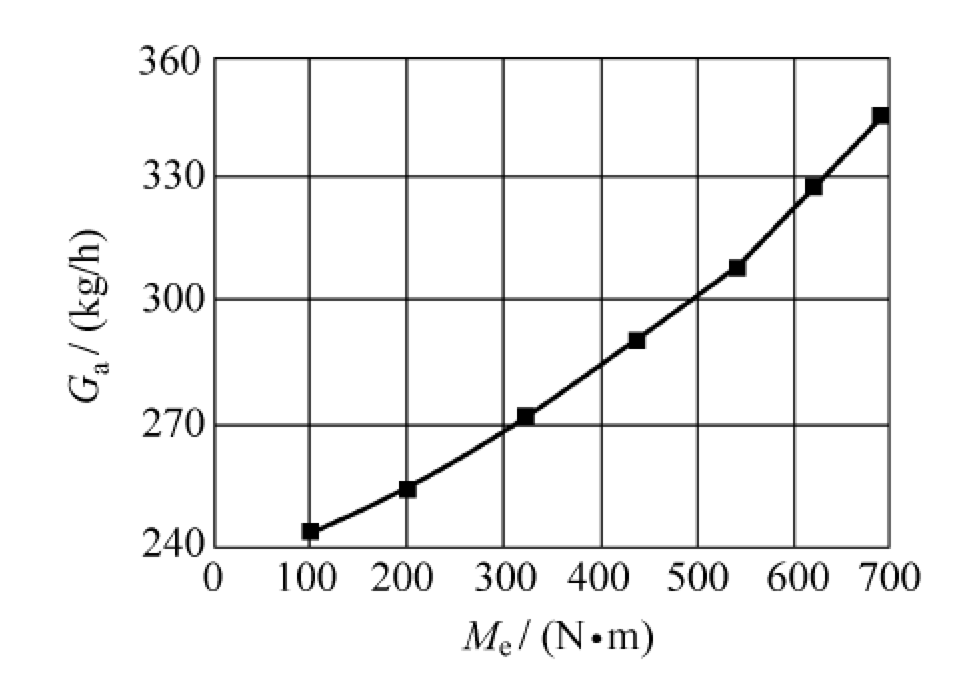


图 A3-10　1250 r/min 进气量曲线

① 对比汽油机与柴油机外特性曲线的差异并分析其原因。

② 对负荷特性曲线中的鱼钩状进行分析，并结合空燃比曲线讨论负荷加大受限制的原因。

③ 对比分析汽油机与柴油机负荷特性曲线的差异及原因，并对二者之间的经济性进行分析。

④ 结合负荷特性进气量曲线，讨论增压与非增压柴油机在循环充气量方面的差异及原因。

⑤ 画出 8 条以上不同转速下的负荷特性曲线，绘出万有特性图，在此基础上分析该柴油机经济性，并与汽油机进行对比分析。

⑥ 针对试验中出现的各种异常现象，分析、探讨其原因。

试验 4　汽油机灭缸法机械损失试验

4.1　试验目的

(1) 了解和掌握汽油机灭缸法的试验方法和试验目的。

(2) 掌握汽油机机械损失试验曲线的制作和分析。

4.2　试验要求

(1) 按照指导教师的要求进行机械损失试验，从中理解汽油机灭缸法的试验目的和方法。

(2) 掌握汽油机机械损失功率的计算及机械效率曲线的制作，结合原理分析其机理。

(3) 其余内容同试验 1 的 1.2 中(3)、(4)、(5)。

4.3 主要仪器设备

内容同试验 1 中的 1.3。

4.4 汽油机台架系统装置

内容同试验 1 中的 1.4。

4.5 试验对象、燃料

内容同试验 1 中的 1.5，如条件允许可使用在研汽油机作为试验教学对象。

4.6 试验步骤及内容

(1) 无论做什么试验，试验前均要检查汽油机安装是否正确、安全、可靠；然后打开燃油开关、冷却水阀门及各测试系统开关，如汽油机测控仪等；接着起动汽油机，检查汽油机运转时有无明显的不稳定现象；无问题时则开始进行汽油机预热及试验前的其他准备工作。

(2) 汽油机灭缸法有两种方法：一种是断油；另一种是断火。后一种方法不建议使用，因该方法会在排气系统内产生大量燃油，极易引起后燃爆炸。

(3) 当汽油机达到预热要求后，将汽油机节气门(油门)全开，进行外特性试验。试验工况起始点从额定转速逐渐降低，直至最低工作转速。每个试验工况点稳定后(尤其关注排气温度)方可进行试验测试，测试试验数据记录表可参考表 A4-1。

表 A4-1 汽油机的外特性试验数据结果

<table>
<tr><td colspan="9">试验名称：外特性试验</td></tr>
<tr><td colspan="2">试验日期</td><td colspan="3">时间</td><td colspan="2">地点</td><td colspan="2">汽油机型号</td></tr>
<tr><td colspan="5">燃油编号</td><td colspan="2">密度/(kg/m³)</td><td colspan="2" rowspan="2">试验人员</td></tr>
<tr><td colspan="5">大气压力/kPa</td><td colspan="2">进气温度/℃</td></tr>
<tr><td>序号</td><td>转速
/(r/min)</td><td>扭矩
/(N·m)</td><td>功率
/kW</td><td>出水温度
/℃</td><td>机油温度
/℃</td><td>进气温度
/℃</td><td>机油压力
/kPa</td><td>大气压力
/kPa</td></tr>
<tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

(4) 进行某一转速 x(r/min)下的灭缸试验。首先测出汽油机的有效功率，然后对第 i 缸灭缸，调整测功机使汽油机转速恢复原值且稳定后，测出有效功率 P_{ei}，得到被灭缸的指示功率：$P_i=P_e-P_{ei}$。试验测试数据表格如表 A4-2 所示。

（5）用同样方法依次进行各缸断油试验，以此类推，最后得到第 n 缸指示功率，由此可计算出汽油机的总指示功率为

$$P_i = \sum_{i=1}^{n} P_{i-1}$$

表 A4-2　x(r/min)断油试验数据结果

试验名称：x(r/min)断油灭缸试验								
试验日期			时间	地点		汽油机型号		
燃油编号				密度/(kg/m³)		试验人员		
大气压力/kPa				进气温度/℃				
外特性点	转速/(r/min)	扭矩/(N·m)	功率/kW	出水温度/℃	机油温度/℃	进气温度/℃	机油压力/kPa	大气温度/℃
断油缸号								指示功率/kW
1								
总指示功率 P_i								
总机械损失功率 P_m								

（6）根据测得的有效功率和指示功率，即可算出汽油机的机械损失功率：

$$P_m = P_i - P_e$$

计算试验数据表格，如表 A4-3 所示。

表 A4-3　汽油机机械损失功率及机械效率数据结果

试验名称：汽油机机械损失功率及机械效率试验							
试验日期		时间		地点		汽油机型号	
燃油编号				密度/(kg/m³)		试验人员	
大气压力/kPa				进气温度/℃			
序号	转速/(r/min)	机械损失功率/kW	出水温度/℃	机油温度/℃	进气温度/℃	机油压力/kPa	机械效率/%
1							

4.7　试验数据整理及总结分析要求

(1) 按表 A4-1 填写外特性试验结果数据表格，按表 A4-2 分别填写各灭缸测试试验值。

(2) 计算汽油机机械损失功率及机械效率，将数据填入表 A4-3 中。

(3) 作出机械损失功率及机械效率随转速的变化曲线，如图 A4-1 所示。

(4) 分析讨论上述两条曲线的变化趋势及原因。

(5) 分析讨论灭缸法测汽油机机械效率的优缺点及其误差来源。

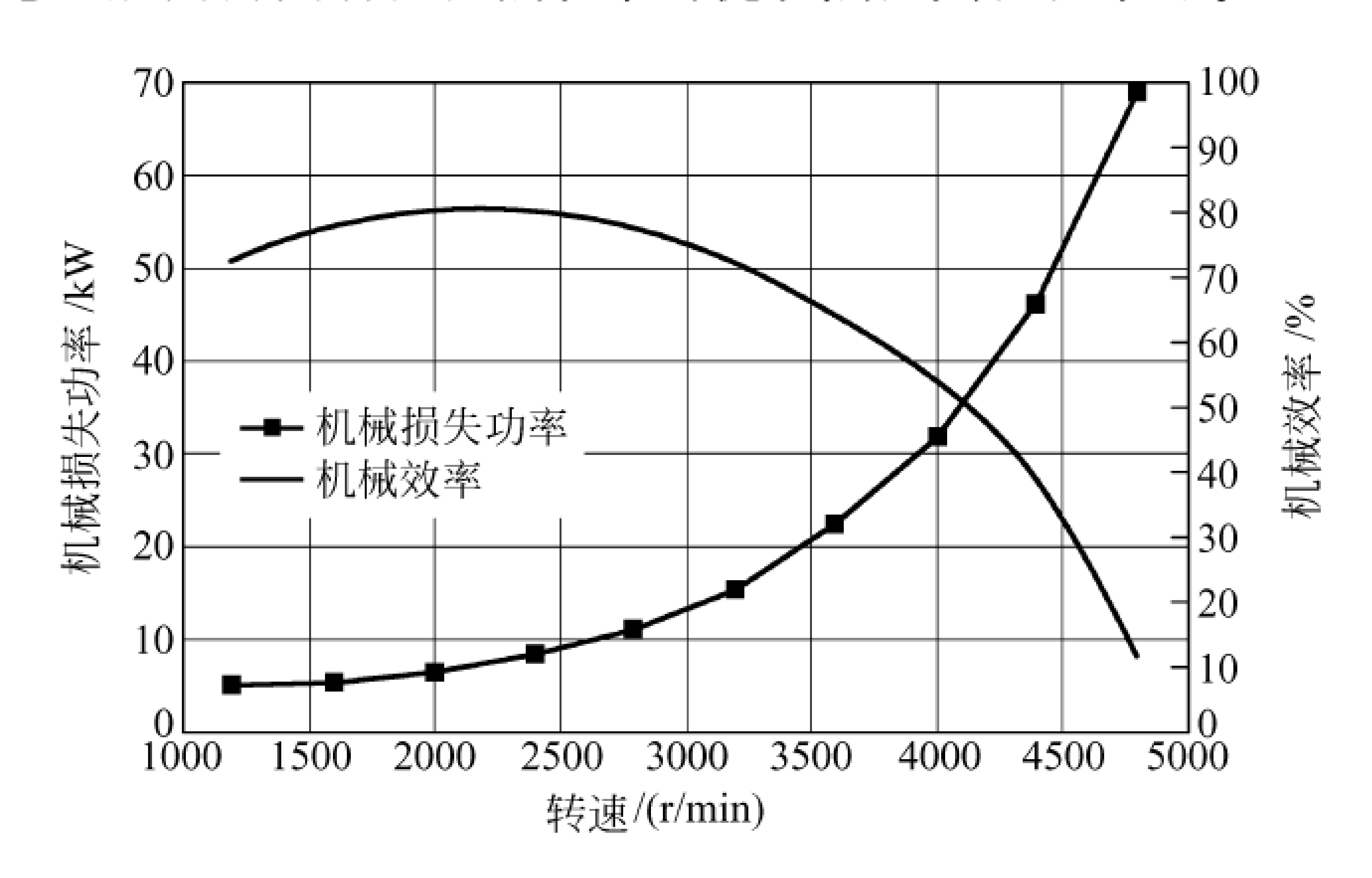


图 A4-1　汽油机机械损失功率及机械效率曲线

试验 5　电控汽油机点火提前角 MAP 图测定试验

5.1　试验目的

(1) 了解电控汽油机的电控管理系统。

(2) 掌握试验数据处理、曲线及三维曲面(MAP 图)的制作方法。

(3) 分析汽油机性能参数随点火提前角的变化规律以及点火提前角 MAP 图的特点，并掌握不同点火提前角对汽油机性能的影响。

5.2　试验要求

(1) 了解和掌握电控汽油机点火提前角的测量目的和试验方法。

(2) 为保证试验的顺利进行，试验前需认真阅读本书第 5 章，同时复习内燃机原理和构造，尤其是电控内燃机中的各传感器原理及安装位置，并了解试验的基本条件。

(3) 试验中，按指导教师的要求操作试验装置，并按步骤进行试验。

(4) 参考第 1 章试验报告格式编写试验测试报告，正确处理试验数据并绘制点火提前角曲线，结合原理进行分析。

5.3 主要仪器设备

本试验的主要仪器设备如表 A5-1 所示。

表 A5-1 试验用主要仪器设备

序 号	设备名称	说 明
1	测功机系统	德国 ZËLLNER 公司 B-220AC 测功机及控制仪
2	空燃比传感器	日本特陶(NGK)生产的宽域空燃比传感器
3	空燃比二次仪表	自行开发的空燃比仪
4	电控开发系统	DELPHI 公司模块开发系统 MDS
5	三效催化器	DELPHI 公司 M82 型催化器
6	进气流量测量	上海同圆公司产热膜式气体质量流量计

(1) 负载为电涡流测功机。其测功机最高转速为 10000 r/min,最大扭矩为 800 N·m,最大功率为 160 kW。

(2) 电控汽油机管理系统为德尔福(DELPHI)系统,如图 A5-1 所示。

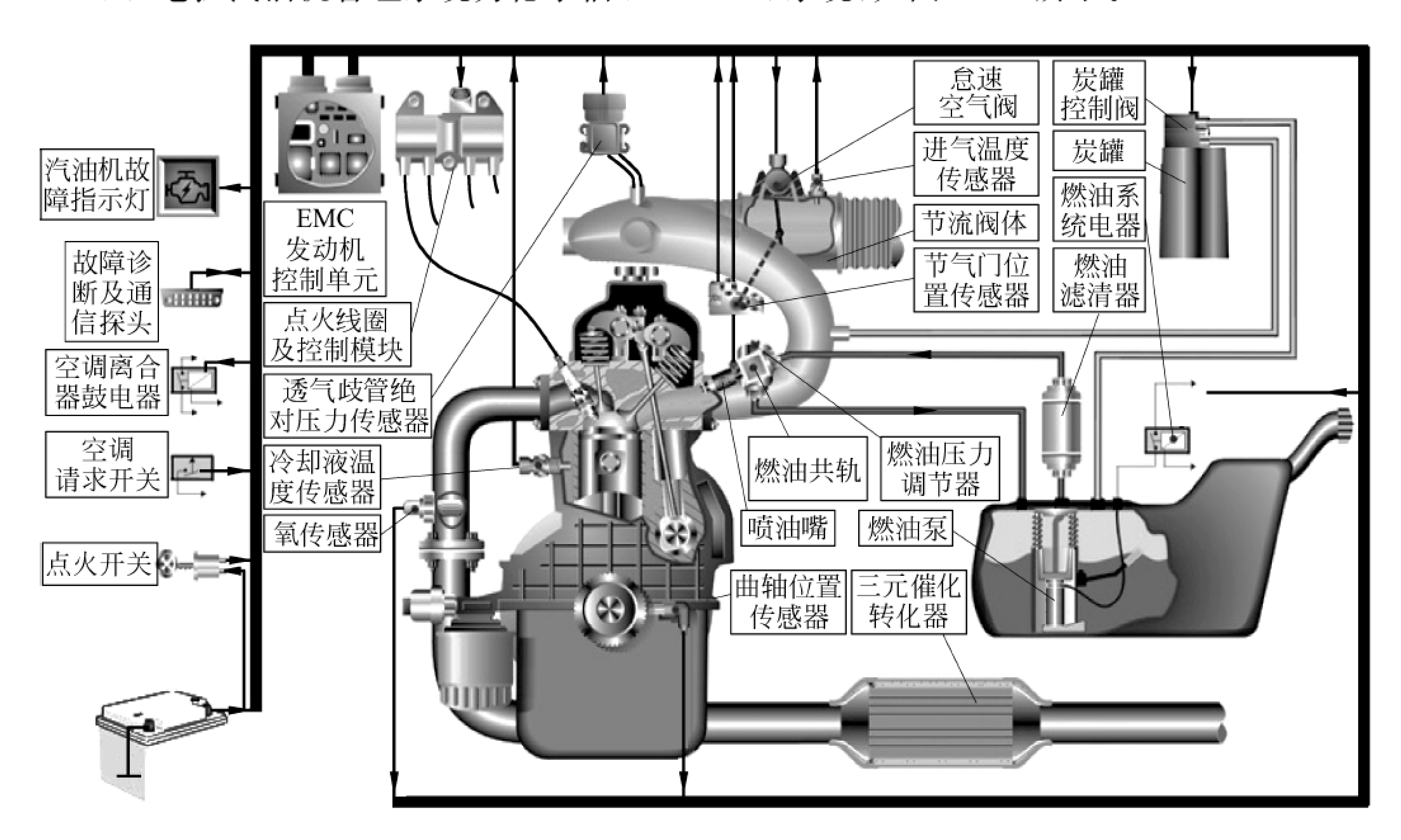


图 A5-1 德尔福电控汽油机管理系统

(3) 电控汽油机系统软件操作界面如图 A5-2 所示。

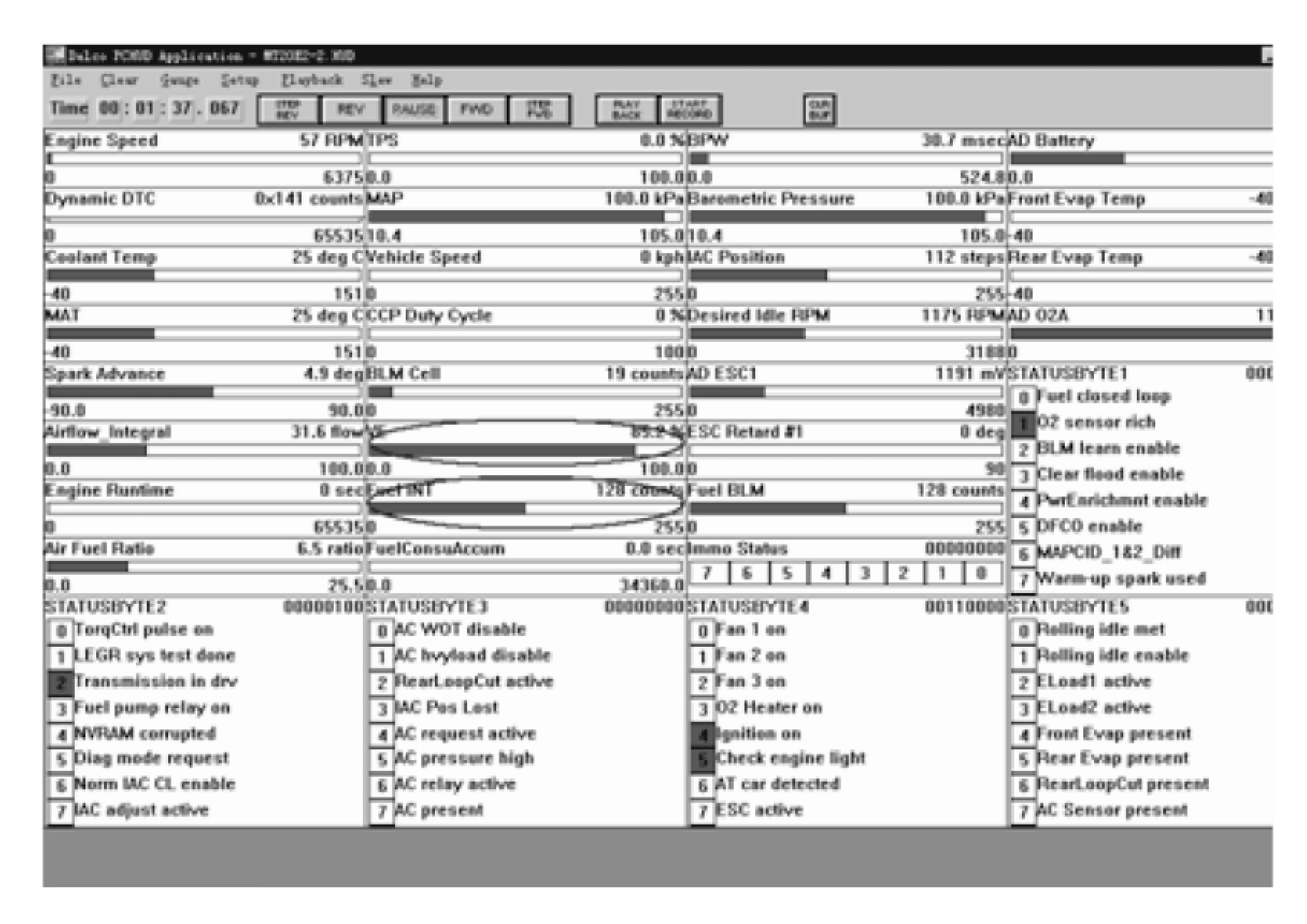


图 A5-2　电控汽油机软件(德尔福)操作界面

5.4　发动机台架系统装置

内容同试验 1 中的 1.4。

5.5　试验对象、燃料

内容同试验 1 中的 1.5，如条件允许可使用在研汽油机作为试验教学对象。

5.6　试验内容

(1) 试验前的第一步非常关键，具体可参考试验 1 中的 1.7 中(1)。

(2) 点火提前角的测量是在不同节气门开度与不同转速组成的工况面节点处进行，通过改变点火提前角，进而可获得扭矩和油耗等相关参数。

(3) 试验中每个测量点采用测功机恒转速、汽油机恒油门调节方式控制汽油机转速。

(4) 在指导教师的指导下，确定所需标定工况：转速和进气管压力。

(5) 对所选工况，即汽油机转速 x(r/min)和进气管压力 x(kPa)稳定后，将点火提前角由小调到大逐步改变，改变间隔为 2°左右，同时进行如扭矩、油耗等参数测量，测量点应尽可能地多，试验记录表格如表 A5-2 所示。

(6) 转速不变，依次改变进气管压力，进行上述试验测试。

(7) 其他转速点的试验测试方法同(5)、(6)。

(8) 点火提前角试验还应记录排放、噪声等相关性能参数。在教学试验中如时间和条

件允许，应进行排放和噪声测试。

表 A5-2 汽油机试验数据记录表

汽油机型号			x(r/min)、x(kPa)点火提前角试验						
大气压力/kPa			大气干温度/℃		大气湿温度/℃			试验日期	
燃油编号			汽油密度/(kg/m³)		试验地点			试验人员	
序号	转速/(r/min)	扭矩/(N·m)	功率/kW	进气管压力/kPa	点火角/(°)	油耗/(L/h)	出水温度/℃	机油温度/℃	机油压力/kPa
1									
序号	CO_2/%	$CO/10^{-6}$		$THC/10^{-6}$		$NO_x/10^{-6}$		$O_2/10^{-6}$	
1									

5.7 试验数据整理及总结分析

(1) 按表 A5-2 填写试验测试数据。

(2) 画出扭矩及油耗率随点火提前角变化的曲线族，图 A5-3 为其中一例。

(3) 对试验结果及试验曲线进行分析讨论。

① 各工况点扭矩随点火角变化的曲线及趋势有何特点，分析原因。

② 比较不同油门开度(进气管压力)时的曲线有何特点，分析其原因。

③ 各工况点按动力性、经济性优化点火提前角的原则与依据。

④ 最佳动力性、经济性点火提前角随转速及负荷的变化规律，分析原因。

⑤ 进一步分析，当考虑排放、噪声等因素时，点火提前角又将如何选择。

(4) 综合各组试验曲线，按动力性、经济性优化要求作出点火提前角的三维曲面，如图 A5-4 所示。

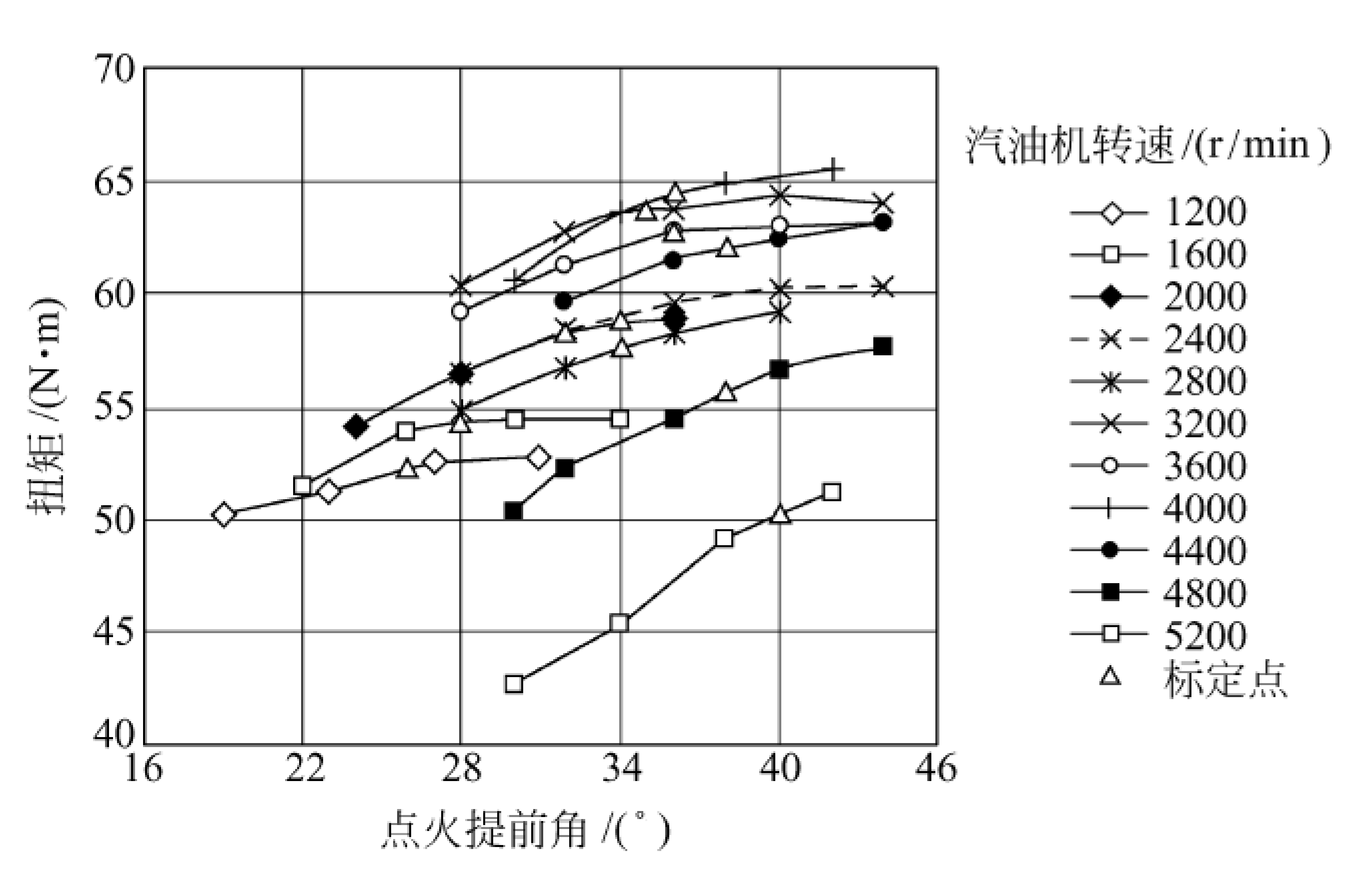


图 A5-3 某电控汽油机进气管压力 50 kPa 时，各转速、扭矩与点火提前角的关系曲线

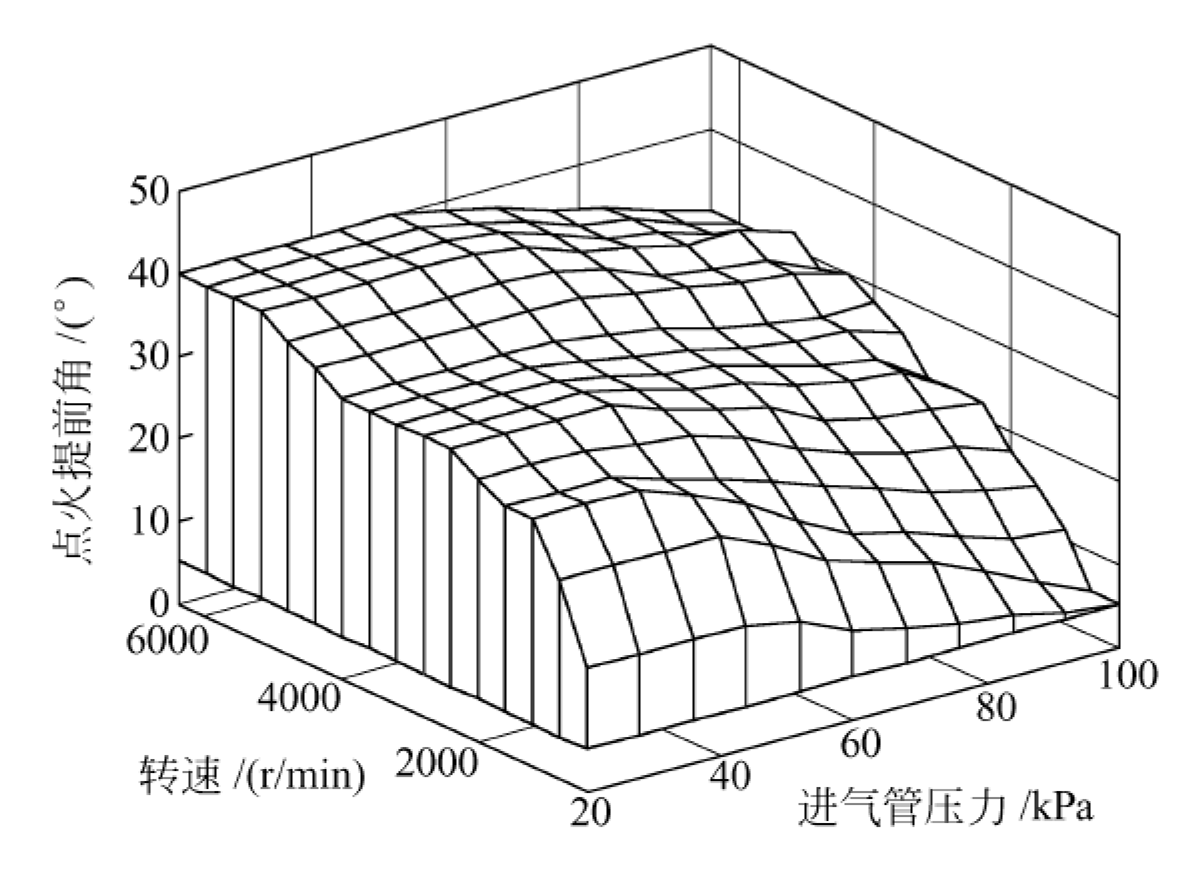


图 A5-4　某电控汽油机点火提前角的三维曲面

试验 6　汽油机排放污染物特性试验

6.1　试验目的

(1) 了解汽油机排放测试系统及原理。

(2) 了解和掌握汽油机排放测试方法及仪器的操作。

(3) 分析汽油机有害气体排放物 CO、THC、NO_x 含量随负荷及转速变化的规律。

6.2　试验要求

(1) 复习内燃机原理相关内容,研读本书第 6 章。

(2) 了解和掌握主要污染物(CO、THC、NO_x)测试基本原理。

(3) 试验过程中需严格按照仪器操作规程使用仪器设备,按试验大纲要求进行试验,观察记录有效数据。

(4) 参考第 1 章试验报告格式说明编写试验测试报告。

6.3　主要仪器设备

(1) 负载系统即测功机和油耗仪与试验 1 中的 1.3 相同,读者可参考。

(2) 气体质量流量计:采用上海同圆公司生产的 ToCeiL 热膜式气体质量流量计,测量汽油机进气空气消耗量。主要参数:最大测量流量 600 kg/h,分辨率±0.1 kg/h,测量精度为±1%。

(3) 空燃比仪:采用日本 NGK 生产的 A/F-Boost Meter,最大测量空燃比为 30,分辨率±0.05,测量精度±1%。

(4) 排放成分分析测试系统仪器为 AVL 公司的 CEB-Ⅱ型排气分析仪,主要参数如

表 A6-1 所示。

表 A6-1　CEB-Ⅱ型排气分析仪参数

序号	名称	测量原理	测量范围	分辨率
1	CO	不分光红外线法(NDIR)	0～10%	0.1×10^{-6}
2	THC	氢火焰离子法(FID)	$0\sim30\,000\times10^{-6}$	0.1×10^{-6}
3	NO_x	化学发光法(CLD)	$0\sim10\,000\times10^{-6}$	0.1×10^{-6}
4	CO_2	不分光红外线法(NDIR)	0～20%	0.1×10^{-6}
5	O_2	磁力法	0～25%	0.1×10^{-6}
6	A/F	根据排放成分计算		

(5) 取样探头：由不锈钢制成，为一端封口的多孔直管，其取样管内径为 6 mm，壁厚应不大于 1.02 mm。连接探头和排气管的管接头应尽可能地小，以便使探头的热损失减至最小。其结构示意图如图 A6-1 所示。

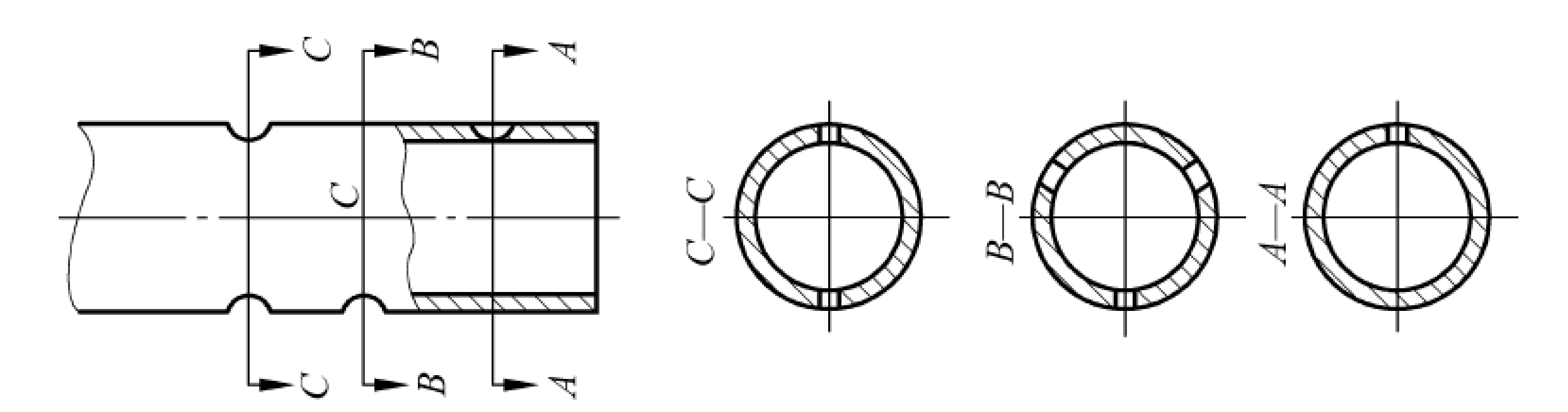


图 A6-1　取样探头装置图

上述仅介绍了常用的典型试验仪器，随着汽车能源动力试验技术的发展，试验仪器的功能及类型发生了很大变化，并已用于科学研究和试验教学。有关仪器读者可参阅本书的第 2、第 3 章及相关资料。

6.4　汽油机台架系统装置

台架试验系统在试验 1 的 1.4 的基础上增加了排放测试仪。

6.5　试验对象、燃料

内容同试验 1 中的 1.5，如条件允许可使用在研汽油机作为试验教学对象。

6.6　试验方法

基本试验方法同试验 1 中的 1.6，同时需参阅本书第 6 章有关排放测试方法介绍。

6.7　试验内容

1. 排放仪器预准备主要内容

(1) 打开总电源控制柜内的排放仪电源。

(2) 开启排放仪外红色开关电源(计算机系统起动)。

(3) 起动计算机系统后，打开显示屏旁小门，开启排放仪内绿色电源开关，排放仪电器开始预热，一般需预热 30 min。

(4) 打开 CGS 电源(颗粒物过滤器)，测试前检查 CGS 内部过滤器是否清洗过及面板温度是否达到 180℃。

(5) 分析单元、采样管预热。

(6) 仪器预热后，进行零点满度校正。校正过程：先打开样气气瓶开关(C_3H_8、O_2、CO、CO_2、NO_x)，再打开气路系统开关，运行零点满度校正自动程序，运行后关闭样气气瓶开关和气路系统开关，并按说明书的要求进行后续工作。

2. 试验程序

(1) 试验前的第一步非常重要，试验者需认真对待，具体可参考试验 1 中的 1.7 中(1)。

(2) 当汽油机达到预热要求后，选取规定的油门位置(如 x%、100%)进行汽油机速度特性试验或选取某一转速，改变油门位置进行汽油机负荷特性试验，每次试验适当选择 8 个以上的测量点。

(3) 负荷特性排放试验过程：确定负荷特性转速为 x(r/min)，转速确定后保持转速不变，通过改变节气门位置改变汽油机负荷，逐点进行试验。负荷选择由最低扭矩值开始，依次升高，直至节气门位置最大结束。试验中要求作出空燃比值改变的拐点。试验所需测量参数参见表 A6-2。

(4) 外特性、部分油门速度特性排放试验：本次试验的节气门开度(TPS)定为 x%。试验点转速由高到低，依次选取 8 个以上测量点。

(5) 试验过程中同步绘制性能监督曲线，如空燃比、排放污染物随转速或负荷变化曲线，通过曲线的变化趋势初步判断试验是否有异常，以决定试验是否需补点或重做。

(6) 因时间及条件限制，各试验小组需分别做不同工况点的排放特性试验，然后汇总，进而可进行综合分析。

(7) 试验结束后需对排放仪进行反吹自动程序，按指导教师要求逐步关闭排放仪的各个开关。

表 A6-2　试验数据记录表

<table>
<tr><td colspan="3">汽油机型号</td><td colspan="7">试验名称：电控汽油机 x(r/min)负荷特性试验</td></tr>
<tr><td colspan="3">大气压力/kPa</td><td colspan="2">大气干温度/℃</td><td colspan="3">大气湿温度/℃</td><td colspan="2">试验日期</td></tr>
<tr><td colspan="3">燃油编号</td><td colspan="2">汽油密度/(kg/m^3)</td><td colspan="3">试验地点</td><td colspan="2">试验人员</td></tr>
<tr><td>序号</td><td>转速/(r/min)</td><td>扭矩/(N·m)</td><td>功率/kW</td><td>进气管压力/kPa</td><td>点火角/(°)</td><td>油耗/(L/h)</td><td>出水温度/℃</td><td>机油温度/℃</td><td>机油压力/kPa</td></tr>
<tr><td>1</td><td></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>序号</td><td>CO_2/%</td><td colspan="2">CO/10^{-6}</td><td colspan="2">THC/10^{-6}</td><td colspan="2">NO_x/10^{-6}</td><td>O_2/10^{-6}</td><td>空燃比</td></tr>
<tr><td>1</td><td></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td></td><td></td></tr>
</table>

6.8 试验总结

(1) 整理试验数据，填入表 A6-2 所示试验测试数据表格。

(2) 分别画出被测对象排放污染物 CO、THC、NO_x、CO_2 随负荷变化的曲线，图 A6-2 为其中一例。

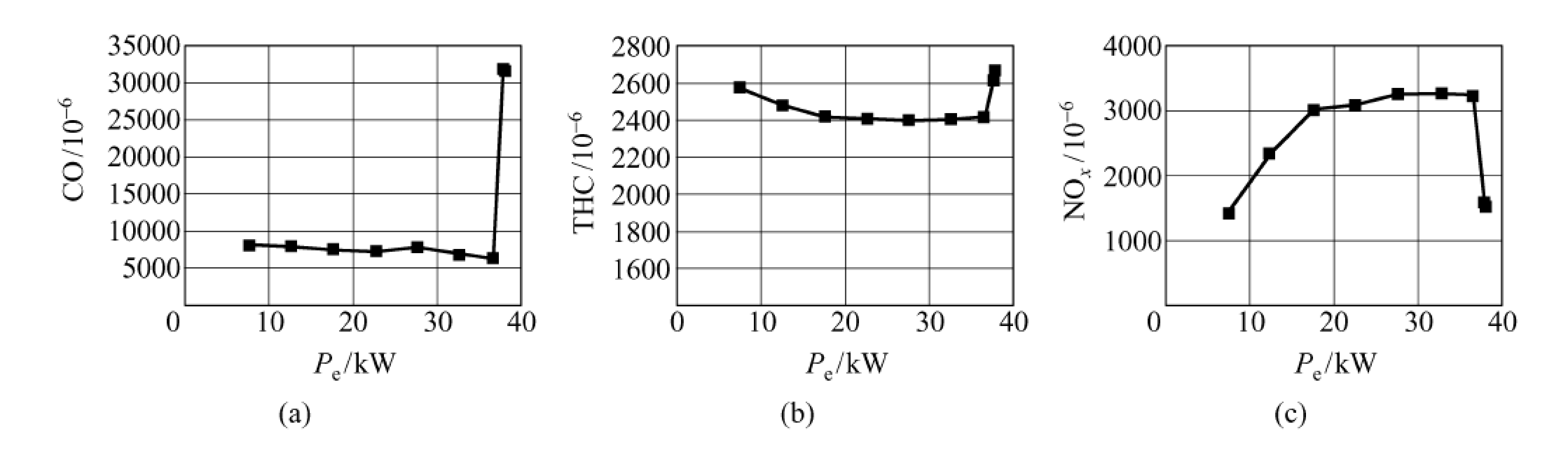


图 A6-2　2400 r/min 负荷特性的排放量随功率变化曲线

(3) 分析上述曲线形成的原因，并作出其他参数随负荷变化的曲线，图 A6-3 为其中空燃比、排气温度随功率的变化曲线。

(4) 结合上述试验所作出的曲线，分析各种排放污染物排放量随负荷变化的规律及原因。

① 分析在最大负荷点处，各种排放污染物排放量急剧变化的原因。

② 分析闭环运行(理想混合气)的负荷范围内，三元催化器的特性。讨论采用三元催化器后仍然出现一定数量排放污染物的原因。

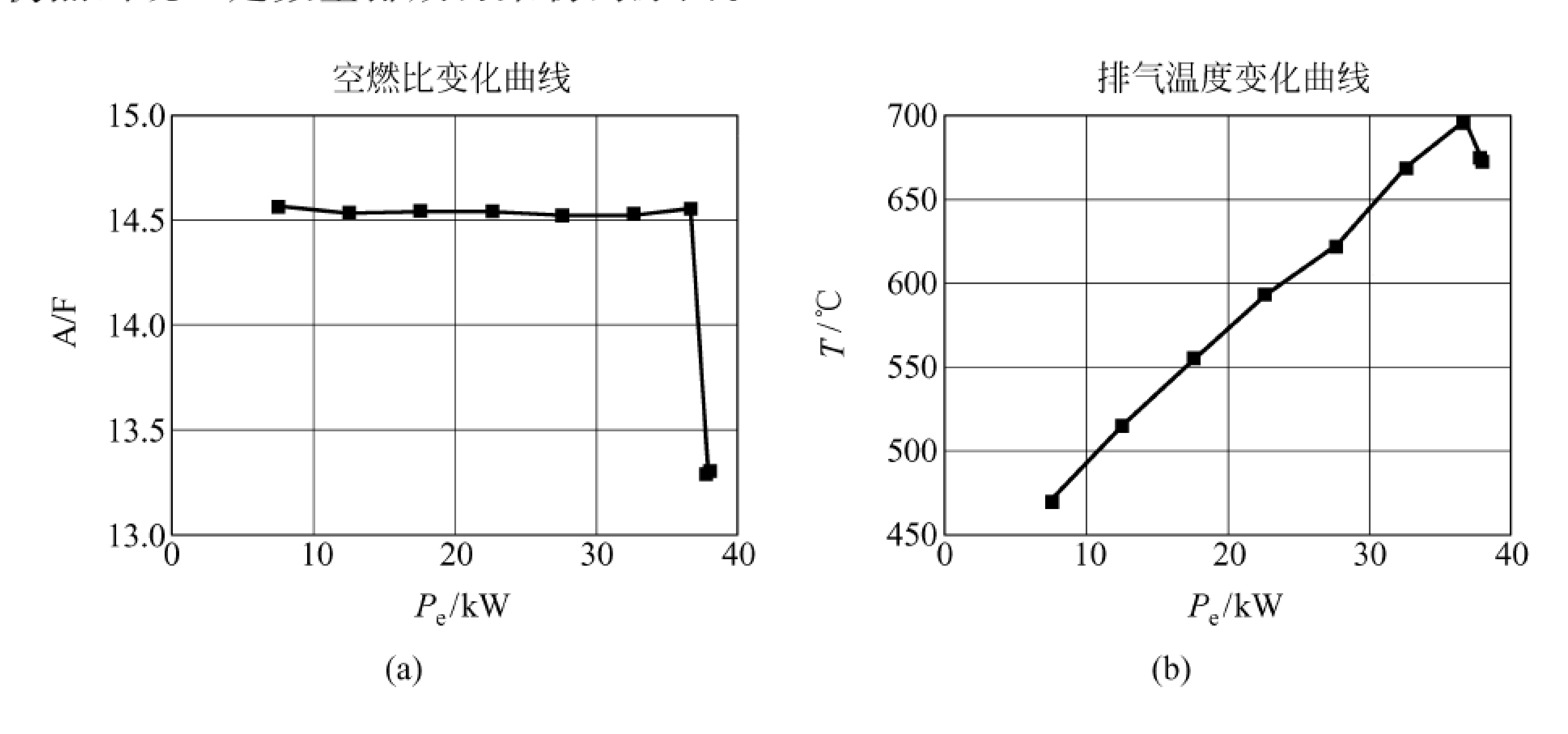


图 A6-3　空燃比及排气温度随功率的变化曲线

试验 7　柴油机排放试验

7.1　试验目的

(1) 了解柴油机排放测试系统及其原理。

(2) 了解和掌握柴油机排放测试方法及仪器的操作。

(3) 掌握柴油机排放测试循环工况及排放特性。

(4) 分析柴油机有害气体排放物 CO、THC、NO_x、CO_2 及微粒随负荷与转速变化的规律。

7.2　试验要求

(1) 复习内燃机原理相关内容,研读本书第 6 章。

(2) 了解试验设备基本原理及试验基本条件。

(3) 试验过程中按指导教师的要求操作仪器设备,了解排放测试程序及测试方法。

(4) 学会试验数据处理方法,编写试验测试分析报告。

7.3　主要设备仪器

(1) 测功机、油耗仪、气体质量流量计、空燃比仪、排气分析仪和取样探头等,同试验 6。

(2) 微粒采样装置为奥地利 AVL 公司生产的 SPC472,最大稀释比 100,分辨率为 ±0.1 L/min,测量精度±2%。

(3) 电子天平为瑞典 METTLER TOLEDO 公司生产的 AX and MX/UMX,精度 10 μg。

(4) 微粒数(PN)测量。颗粒物数量测量是基于凝结颗粒计数器(condensation particle counters,CPCs)的测量方法,法规只要求对粒径在 23 nm～2.5 μm 范围内的固态颗粒物数量进行测量。进一步信息可参阅相关说明书。

7.4　柴油机台架系统装置

柴油机台架排放测试系统简图如图 A7-1 所示。

7.5　试验对象、燃料

内容同试验 3,或在研柴油机。

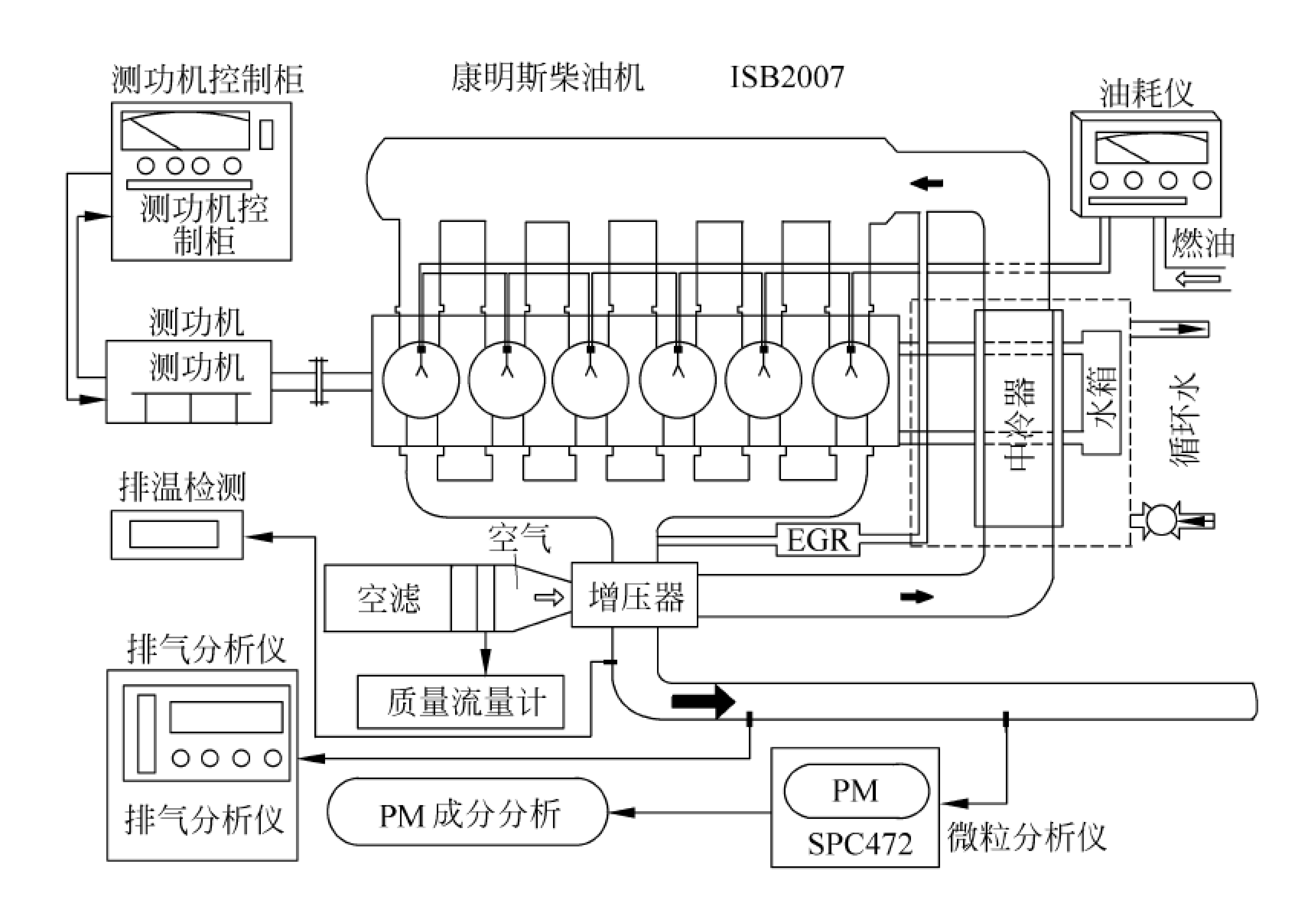


图 A7-1 柴油机台架排放测试系统简图

7.6 试验标准及方法

(1) 试验条件：按国家标准 GB/T 18297—2001《汽车发动机性能实验方法》或厂家规定的试验条件进行控制，如某发动机试验要求为：

① 冷却液的出口温度控制在(88±5)℃。

② 机油温度控制在(90±5)℃。

③ 柴油温度控制在(40±2)℃。

④ 额定功率点(2500 r/min)中冷后温度控制在(49±2)℃。

⑤ 额定功率点(2500 r/min)中冷器压降 12.3 kPa。

⑥ 额定功率点(2500 r/min)排气背压 14.7 kPa。

(2) 试验方法：根据国家标准 GB 17691—2005《车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ阶段)》进行试验。ESC、ELR 和 ETC 等测试循环参阅第 6 章。

7.7 试验内容

(1) 内容同试验 6 中的 6.7 中 1、2(1)。

(2) 在教师的指导下，进行排放分析仪的预热及标定工作。

(3) 进行速度特性和负荷特性试验，试验方法同试验 3。试验所需测量参数如表 A7-1 所示，进而计算排放量，如表 A7-2 所示。

表A7-1 柴油机排放特性试验数据

试验名称：柴油机排放特性试验										
大气压力/kPa		大气干温度/℃		大气湿温度/℃		柴油机型号		试验日期		
燃油编号		燃油密度/(kg/m^3)		试验地点				试验人员		
序号	转速/(r/min)	扭矩/(N·m)	燃油量/(L/h)	进气温度/℃	相对湿度/%	空燃比	微粒/mg	THC/10^{-6}	NO_x/10^{-6}	CO/10^{-6}
1										

表A7-2 柴油机比排放量试验结果

试验名称：柴油机排放特性试验										
大气压力/kPa		大气干温度/℃		大气湿温度/℃		柴油机型号		试验日期		
燃油编号		燃油密度/(kg/m^3)		试验地点				试验人员		
序号	转速/(r/min)	扭矩/(N·m)	功率/kW	燃油量/(g/h)	油耗率/(g/(kW·h))	修正系数 NO_x	微粒/(g/(kW·h))	CO排放量/(g/(kW·h))	THC排放量/(g/(kW·h))	NO_x排放量/(g/(kW·h))
1										

(4) ESC排放测试循环：按表A7-4即ESC(13工况)进行排放试验测试，根据实测的排放量计算出比排放量，记录到如表A7-2所示的表格内，计算出的加权比排放量记录到如表A7-3所示的表格内。

表A7-3 柴油机13工况法排放循环试验加权比排放量结果

实验名称：柴油机13工况法排放循环试验加权比排放量结果										
大气压力/kPa		大气干温度/℃		大气湿温度/℃		柴油机型号		试验日期		
燃油编号		燃油密度/(kg/m^3)		试验地点				试验人员		
序号	转速/(r/min)	扭矩/(N·m)	燃油温度/℃	加权 NO_x/(g/h)	加权CO/(g/h)	加权THC/(g/h)	微粒/(g/(kW·h))	CO加权比排放量/(g/(kW·h))	THC加权比排放量/(g/(kW·h))	NO_x加权比排放量/(g/(kW·h))
1										

表 A7-4 ESC 试验循环

工况 序号	发动机 工况	负荷 /%	加权系数 /%	工况时间 /min
1	怠速	—	0.15	5
2	A	100	0.08	2
3	B	50	0.10	2
4	B	75	0.10	2
5	A	50	0.05	2
6	A	75	0.05	2
7	A	25	0.05	2
8	B	100	0.09	2
9	B	25	0.10	2
10	C	100	0.08	2
11	C	25	0.05	2
12	C	75	0.05	2
13	C	50	0.05	2

7.8 试验总结

(1) 由表 A7-2 及表 A7-3 的试验测试数据，画出特性曲线图。

① 图 A7-2(a)～图 A7-4(a)所示为某柴油机外特性试验排放值随转速变化曲线。

② 图 A7-2(b)～图 A7-4(b)所示为某柴油机负荷特性试验排放值随负荷变化曲线。

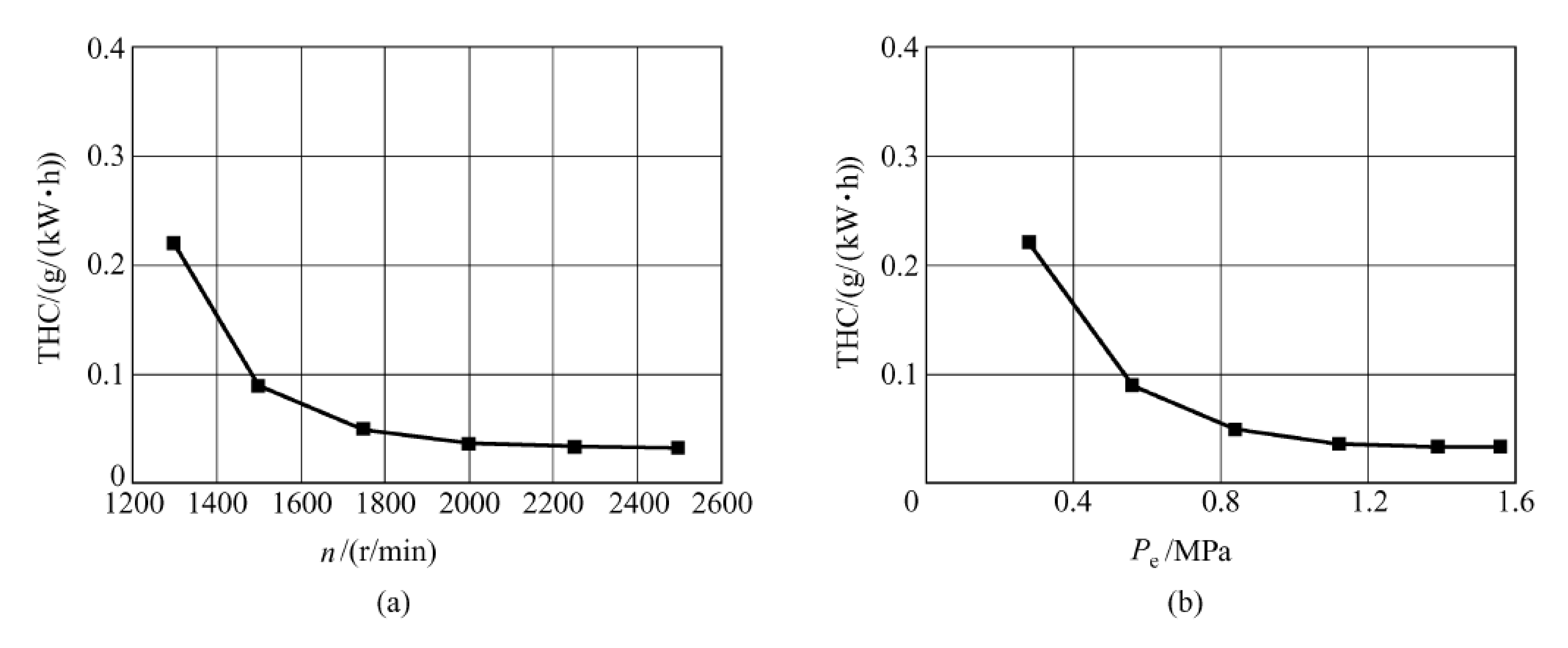


图 A7-2 某柴油机 0# 柴油 THC 排放试验曲线

(a) 外特性 THC 排放变化；(b) 1500 r/min 负荷特性 THC 排放变化

(2) 将各组负荷特性试验曲线汇集组成排放特性曲线族，结合试验结果及特性曲线图进行分析讨论。

① 分析各特性曲线变化趋势及规律，并说明其原因。

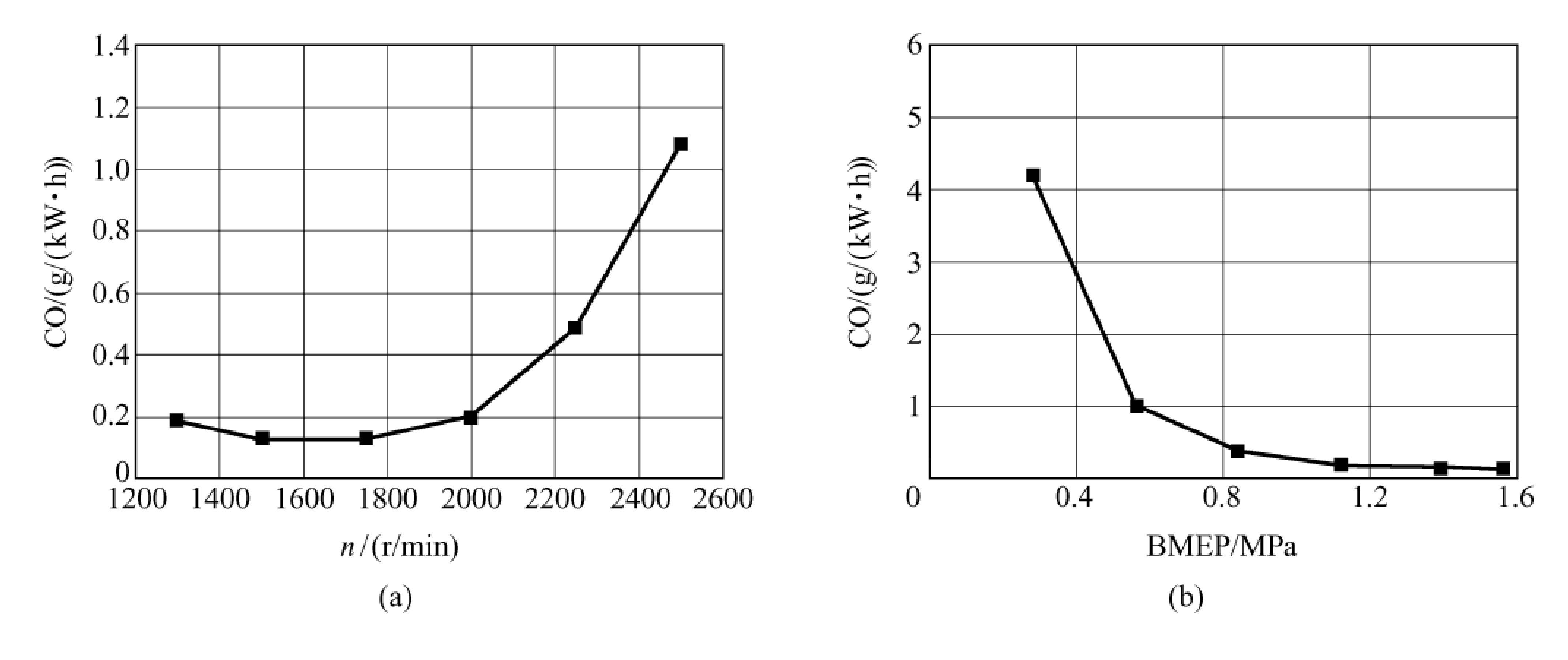


图 A7-3　某柴油机 0# 柴油 CO 排放试验曲线

(a) 外特性 CO 排放变化；(b) 1500 r/min 负荷特性 CO 排放变化

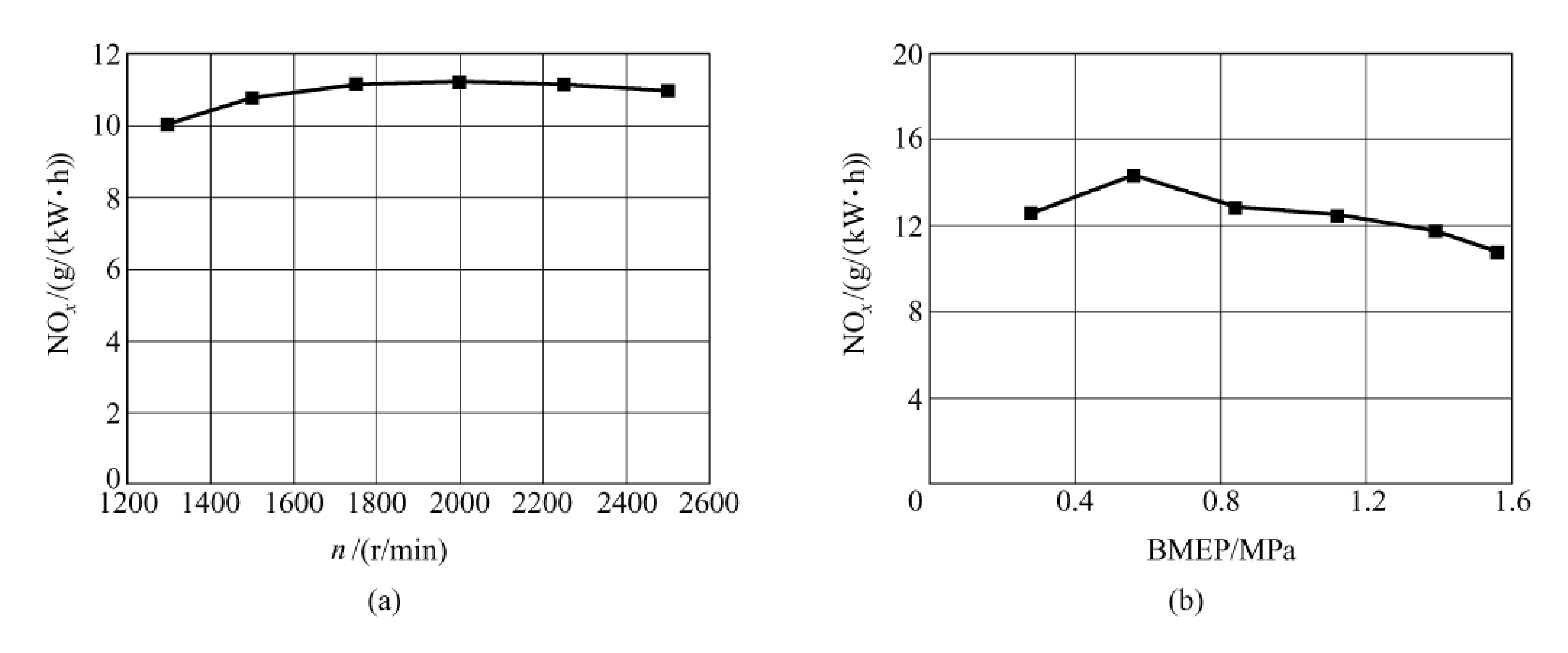


图 A7-4　某柴油机 0# 柴油 NO_x 排放试验曲线

(a) 外特性 NO_x 排放变化；(b) 1500 r/min 负荷特性 NO_x 排放变化

② 与试验 6 汽油机负荷特性排放物试验结果进行对比分析。根据 13 工况 ESC 试验循环试验结果，对试验发动机排放达标情况进行评价，如不达标，讨论应采取何种措施可满足排放标准的要求。

试验 8　内燃机燃烧过程试验

8.1　试验目的

(1) 了解和掌握内燃机缸内压力测试系统结构、原理和测试方法。

(2) 掌握纯压缩线测量、上止点的确定方法及内燃机燃烧过程 p-V 、p-φ 图的制取。

(3) 掌握内燃机燃烧过程及燃烧特性的分析方法。

8.2 试验要求

(1) 复习内燃机原理,进一步理解内燃机示功图的意义。
(2) 研读本书第 2 章和第 3 章,了解示功图制取及分析方法。
(3) 制定试验大纲,试验前与指导教师讨论大纲的可行性。

8.3 主要仪器设备及测试系统

(1) 测功机同试验 3 中的 3.3。
(2) 缸内压力测试系统试验简图,如图 A8-1 所示。

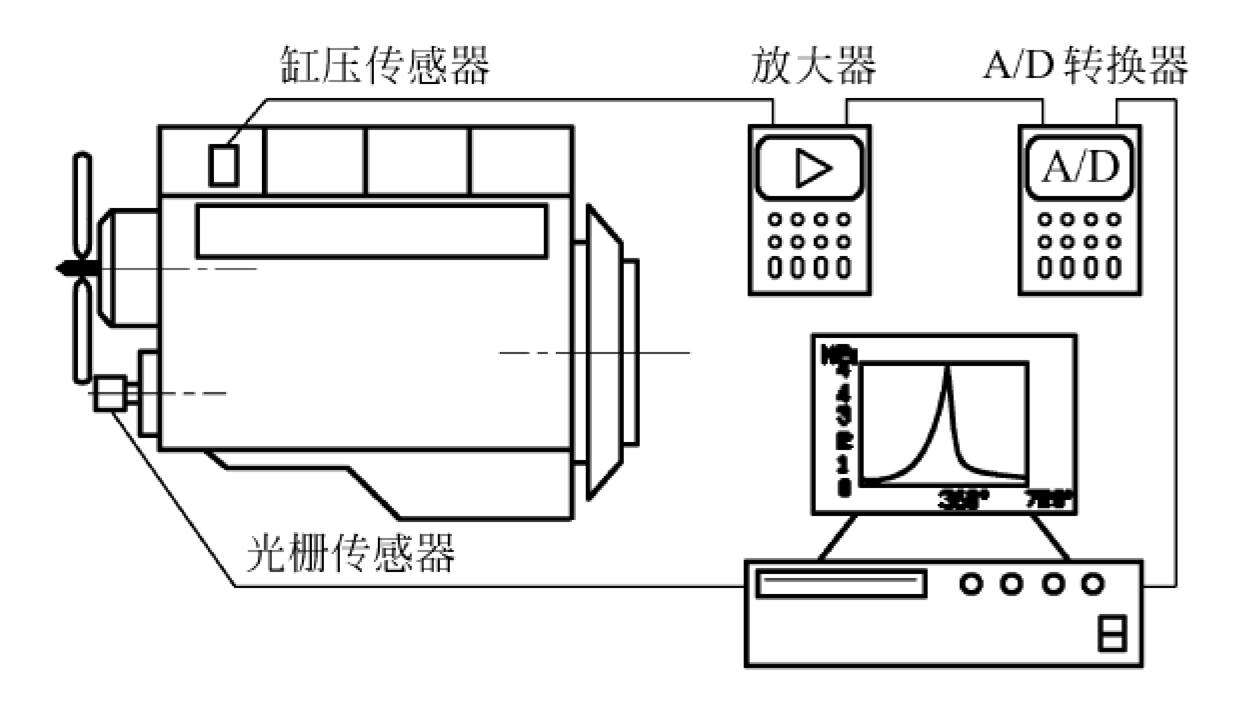


图 A8-1 缸内压力测试系统

(3) 将试验中使用的主要仪器及参数记录到如表 A8-1 所示的表格内。

表 A8-1 主要测试仪器及参数

序号	名　　称	型号	规格	厂家	备　　注
1	缸压传感器				
2	电荷放大器				
3	角标传感器				
4	数采系统				

8.4 试验对象、燃料

同试验 1 中的 1.5 或试验 3 中的 3.5,如条件允许可使用在研内燃机作为试验教学对象。

8.5 试验内容

(1) 按照试验 1 中的 1.7(1)进行试验前的准备。

(2) 在教师的指导下,进行压力测试系统仪器的预热工作。

(3) 暖机直至内燃机出水温度达到 85℃,将试验工况设定到目标工况,本次试验是在某一固定转速下,进行 3 种不同负荷工况(低负荷、中负荷、高负荷)的测试。

(4) 纯压缩线制取:对被测试缸采取灭缸法测取压力与曲轴转角,获得纯压缩线 p-φ,即压力随转角变化关系图,通过纯压缩线确定上止点。在内燃机转速不变的条件下,恢复测试缸供油。

(5) 将内燃机分别调整到 3 种不同负荷工况(低负荷、中负荷、高负荷),同时测量、记录被测内燃机缸内压力与曲轴转角。

8.6 试验总结

(1) 参考表 A8-2～表 8-4 编制试验数据表格,记录灭缸及 3 种不同负荷工况(3 种不同循环供油量)时汽缸压力及曲轴转角等试验数据。

表 A8-2 内燃机 3 种不同负荷工况试验数据 2

序号	曲轴转角/(°)	低负荷		中负荷		高负荷	
		灭缸	工作	灭缸	工作	灭缸	工作
		缸内压力/bar	缸内压力/bar	缸内压力/bar	缸内压力/bar	缸内压力/bar	缸内压力/bar

表 A8-3 3 种不同负荷工况试验数据

工况	喷油始点(点火时刻)曲轴转角/(°)	缸压脱离压缩线点曲轴转角/(°)	滞燃期长度/(°)	最高爆发压力/曲轴转角位置/(bar/(°))	燃烧持续期始点相位/(°)	燃烧持续期终点相位/(°)	燃烧持续期/(°)
低负荷							
中负荷							
高负荷							

表 A8-4 内燃机 3 种不同负荷工况试验数据 1

工　况	内容	转速/(r/min)	扭矩/(N·m)	水温/℃	功率/kW	喷油角或点火角/(°)
低负荷	工作					
	灭缸					
中负荷	工作					
	灭缸					
高负荷	工作					
	灭缸					

(2) 为有效分析试验数据，一般取 10～20 个循环测试数据进行平均化处理，然后绘制 p-φ 图并进行分析(p-φ 图绘制方法可参考附录 B)。

(3) 画出如图 A8-2、图 A8-5 所示的 3 种不同负荷工况的 p-φ 图及纯压缩线的 p-φ 图。根据被测内燃机的排量、压缩比、曲柄半径、连杆长度作出 p-V 曲线图，如图 A8-3、图 A8-6 所示，在此基础上指出如表 A8-3 所示的被测内燃机试验参数。

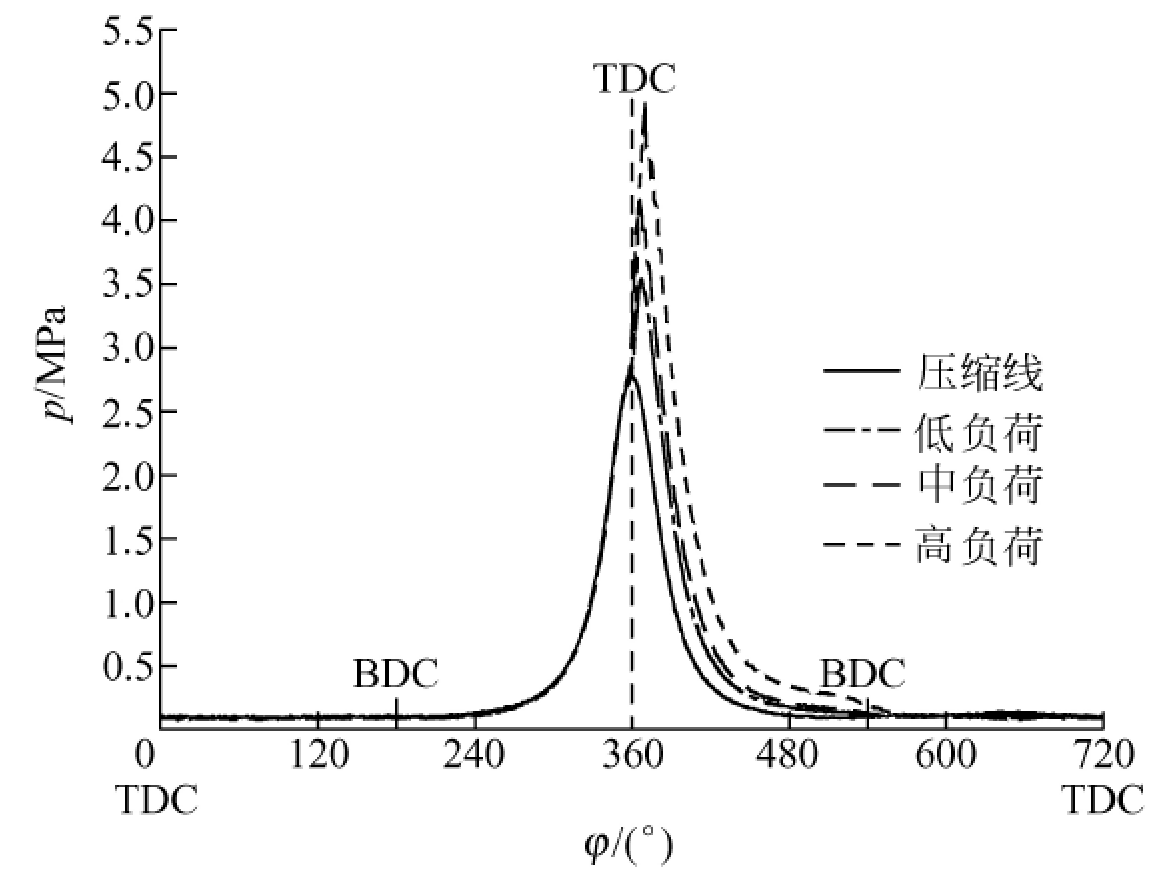


图 A8-2 柴油机 3 种不同负荷工况的缸内压力 p-φ 曲线

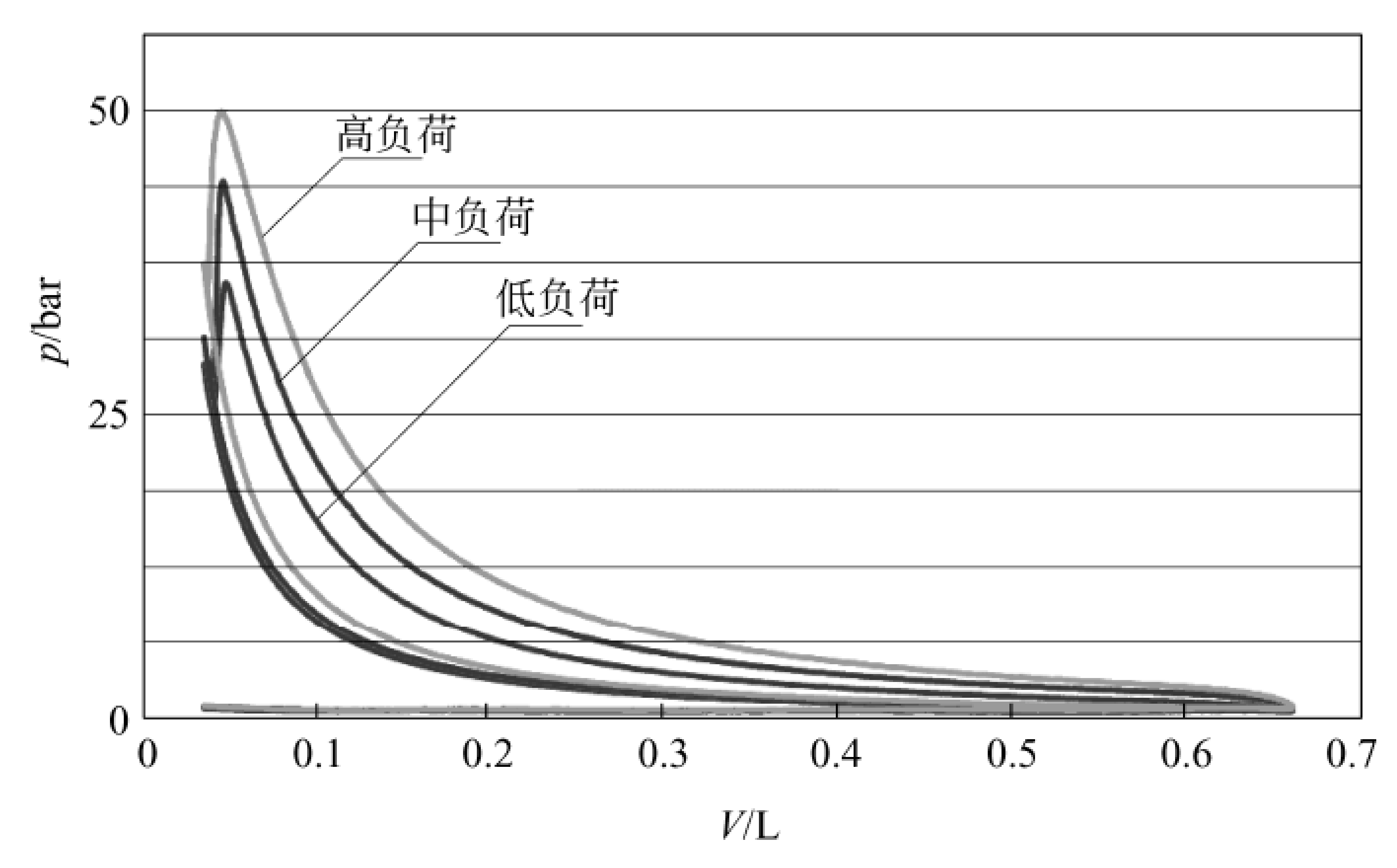


图 A8-3 柴油机 3 种不同负荷工况的 p-V 曲线

(4) 计算累计放热率并绘制曲线，如图 A8-4、图 A8-7 所示。

(5) 试验结果分析(以下分析点仅供参考)：

① 3 种不同负荷工况下的 p-φ 图与纯压缩线的 p-φ 图是否重合。若有偏差，是否有规律，分析其原因，并认知设置上止点热力损失补偿角的原因。

② 分析灭缸试验法作纯压缩线时，可能存在的误差。与内燃机不工作时，通过拖动内燃机所获得的纯压缩线进行对比分析。

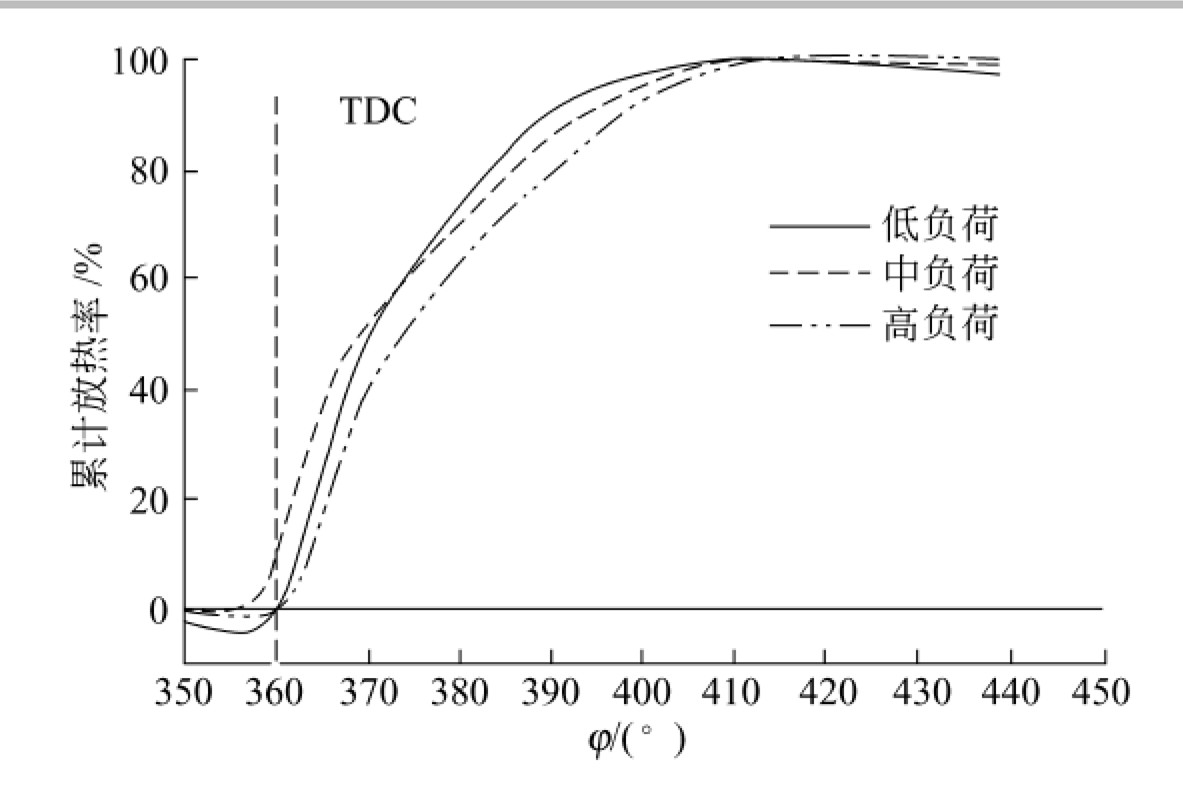


图 A8-4　柴油机 3 种不同负荷工况的累计放热率曲线

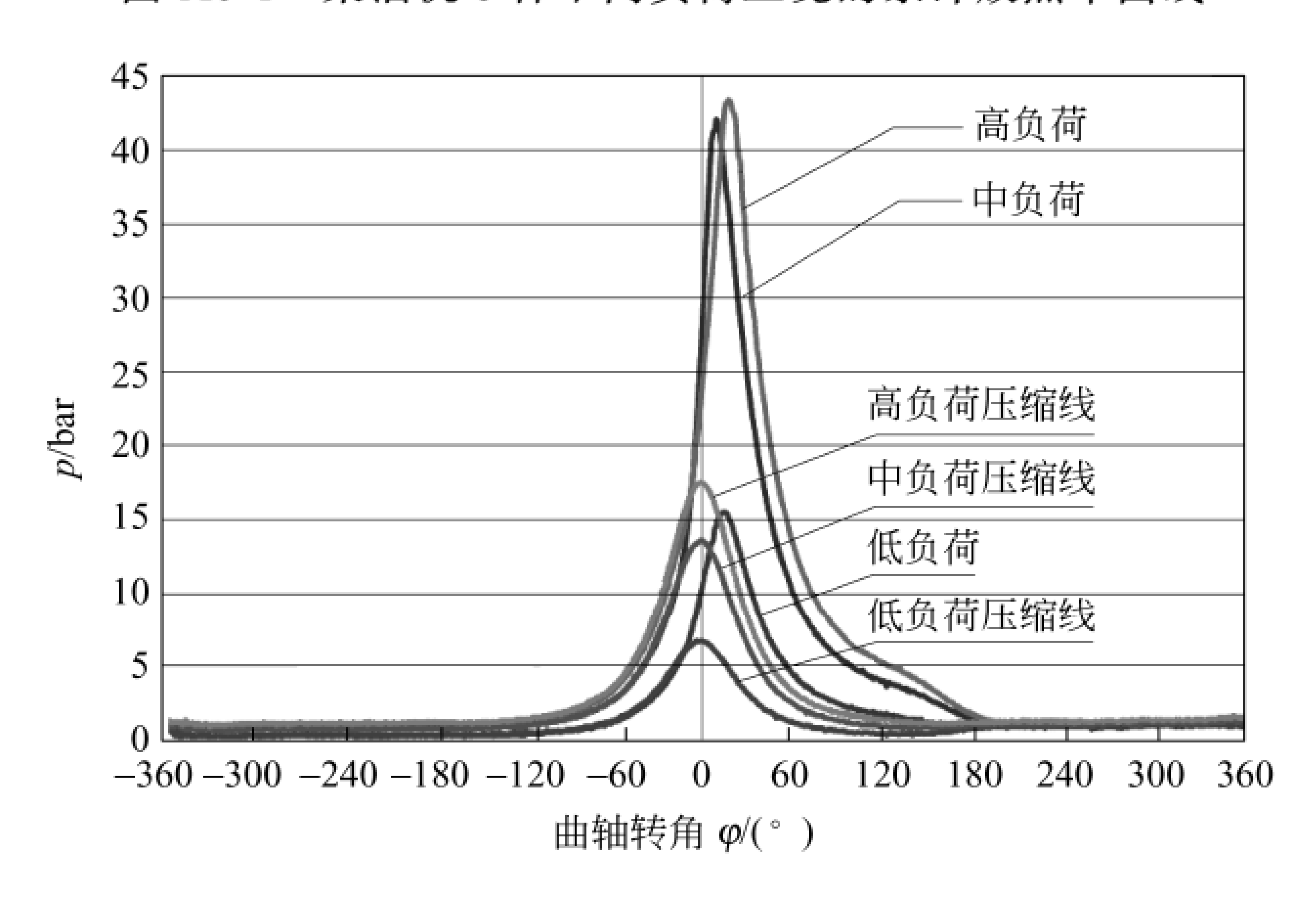


图 A8-5　汽油机 3 种不同负荷工况的缸内压力 p-φ 曲线

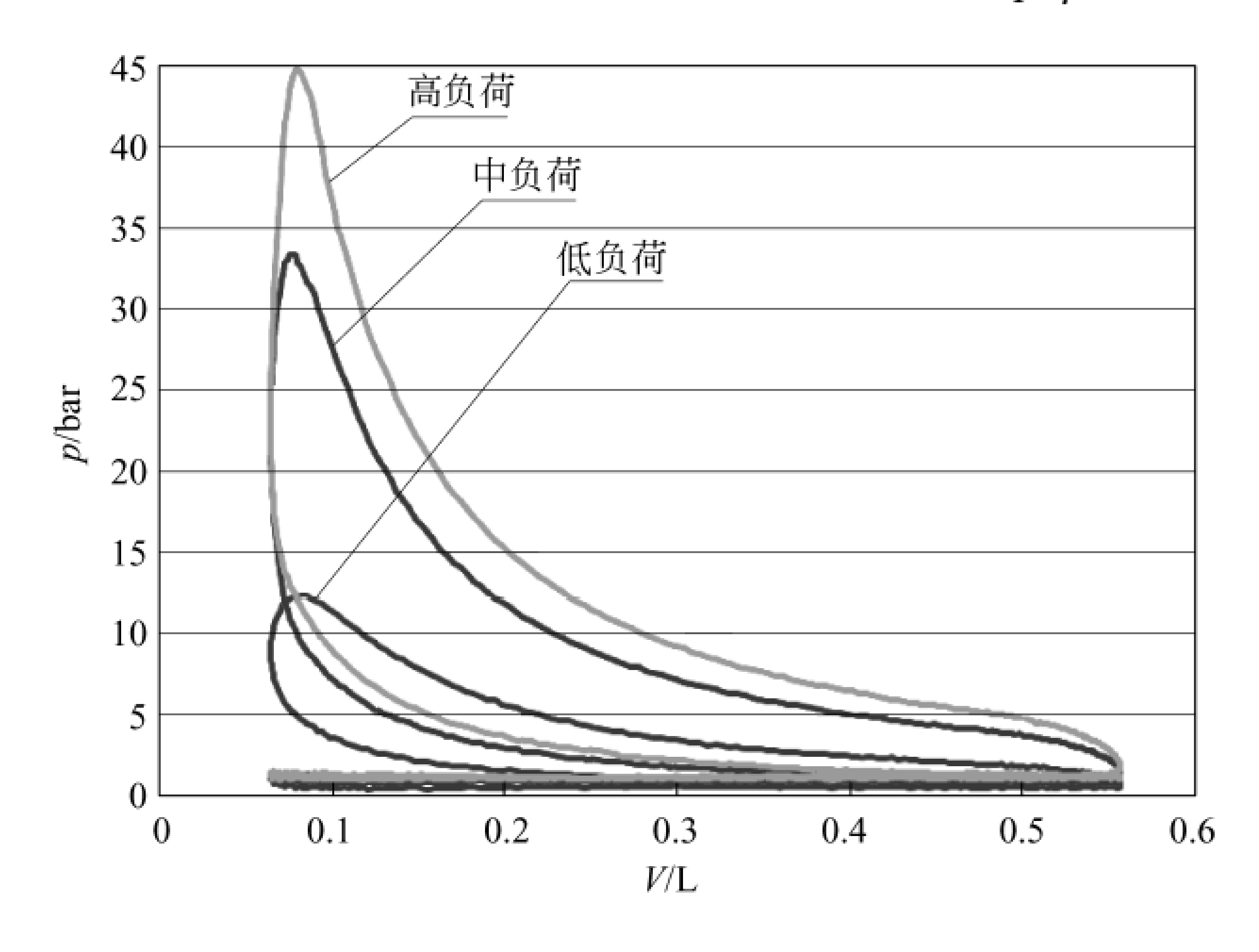


图 A8-6　汽油机 3 种不同负荷工况的 p-V 曲线

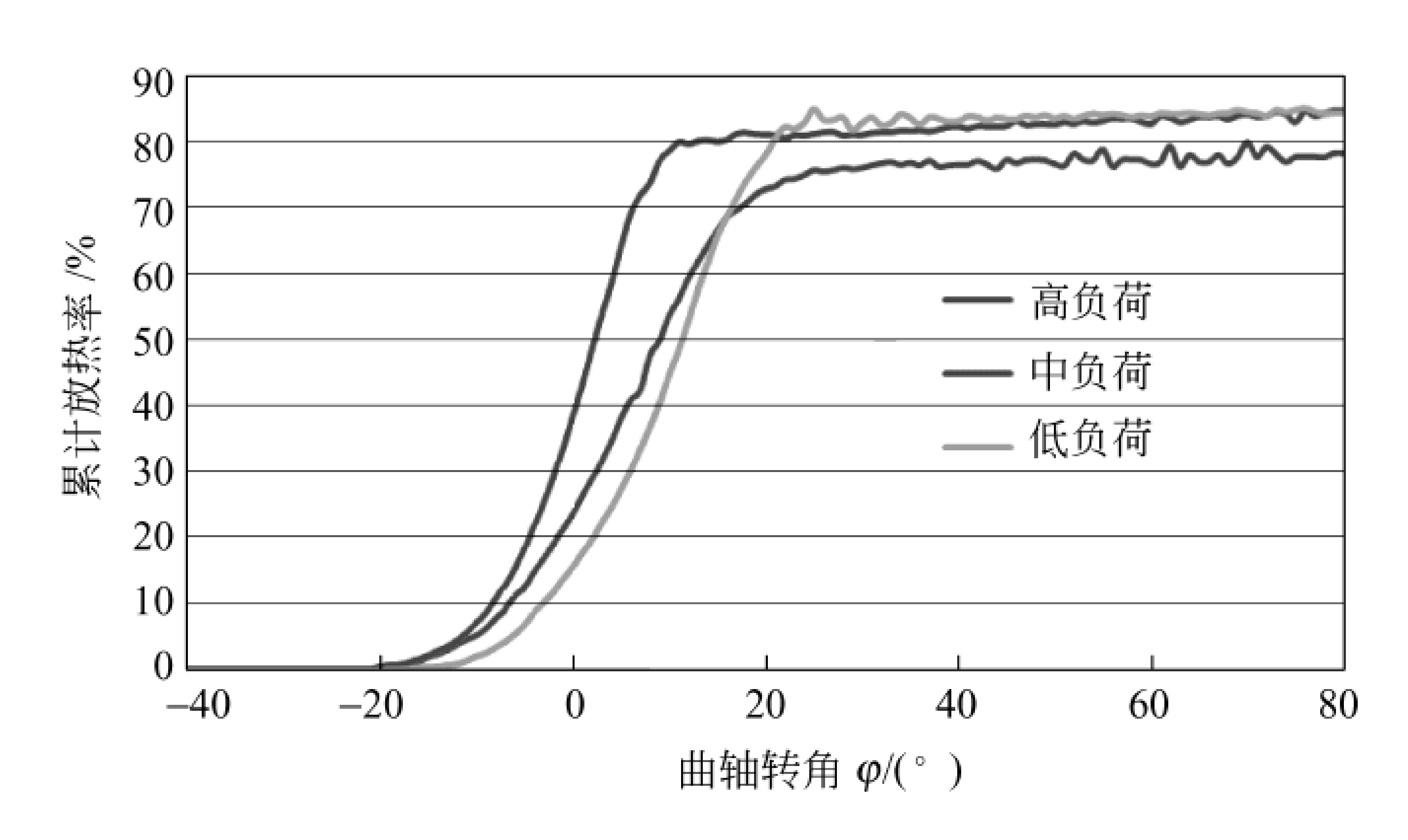


图 A8-7　汽油机 3 种不同负荷工况的累计放热率曲线

③ 对内燃机 3 种不同负荷工况(低负荷、中负荷、高负荷)下 p-φ 图进行分析论述,在图中标明上/下止点、喷油时刻/点火时刻、燃烧始点、燃烧期终点位置,并对其滞燃期、最大压力相位、最大爆发压力值以及燃烧持续期始点、燃烧持续期终点、燃烧持续期进行对比分析。

④ 作出 $\mathrm{d}p/\mathrm{d}\varphi$-$\varphi$ 和 $\mathrm{d}Q/\mathrm{d}\varphi$-$\varphi$ 曲线图,分析压力升高率和放热率随曲轴转角变化的特点与规律。

试验 9　汽油机三元催化器评价

9.1　试验目的

(1) 了解汽油机三元催化器评价方法。

(2) 了解汽油机三元催化器前、后排放特性。

(3) 了解和掌握三元催化器与汽油机的匹配关系。

9.2　试验要求

(1) 复习内燃机原理相关内容及本书第 6 章。

(2) 编制试验大纲,经指导教师认可方可进行试验。

(3) 编写试验报告,正确处理试验数据及规范列出试验数据和计算结果表格,绘制电控汽油机三元催化器前、后的 A/F、CO、THC、NO_x 曲线及转化效率曲线,结合原理进行分析与讨论。

9.3　试验设备

内容同试验 6 的 6.3。

9.4 汽油机台架系统装置

内容同试验 1 的 1.4。

9.5 试验对象、燃料

内容同试验 1 的 1.5。

9.6 试验标准及方法

内容同试验 1 的 1.6。并参照标准《环境保护产品技术要求_汽油车用催化转化器》(HJ/T 331—2006)进行试验。

9.7 试验步骤及内容

(1) 排放仪器预准备主要内容

① 打开总电源控制柜内的排放仪电源。

② 开启排放仪外红色开关电源(计算机系统启动)。

③ 启动计算机系统后,打开显示屏旁小门,开启排放仪内绿色电源开关,排放仪电器开始预热,一般预热需 30 min。

④ 打开 CGS 电源(颗粒物过滤器),测试前检查 CGS 内部过滤器是否清洗过及面板温度是否达到 180℃。

⑤ 分析单元、采样管预热。

⑥ 仪器预热后,进行零点满度校正,校正过程:先打开样气气瓶开关(C_3H_8、O_2、CO、CO_2、NO_x),再打开气路系统开关,运行零点满度校正自动程序,运行后关闭样气气瓶开关和气路系统开关,并按说明书的要求进行后续工作。

(2) 试验程序

① 检查汽油机安装是否正确、安全、可靠。打开燃油开关、冷却水阀门及各测试系统开关,如汽油机测控仪等,起动汽油机,检查运转时有无明显的不稳定现象。无问题则进行汽油机预热及实验前的其他准备工作。

② 三元催化器预处理:当汽油机达到预热要求后,选取规定的油门位置(如 $x\%$、100%)使汽油机排气量满足催化器空速不小于 60000 h^{-1},入口温度在 700℃以上,运行 1 h。

③ 空燃比特性试验:选取某一转速、变化油门位置使汽油机排气量满足催化器空速在(40000±400)h^{-1},入口温度在(450±10)℃,改变汽油机空燃比控制($A/F=14$ 开始,到 15.0 结束),试验点不少于 7 个。试验测量数据记录表格如表 A9-1 所示。

④ 起燃温度特性试验:催化器空速在(40000±400)h^{-1},汽油机空燃比控制在闭环下($A/F=14.6$)。改变入口温度(200~500℃),试验点不少于 7 个。试验测量数据记录表格如表 A9-2 所示。

⑤ 试验过程中同步绘制性能监督曲线，主要排放物随空燃比或入口温度变化曲线，通过曲线的变化规律初步判断 T_{50}点（转化率为 50%）试验是否合适，以决定试验点是否加密。

⑥ 由于时间及条件限制，每组不能完成汽油机全部工况点的排放特性试验，要求分组各自完成不同的部分，总结时综合进行分析。

⑦ 试验结束后需对排放仪进行反吹自动程序，按指导教师要求逐步关闭排放仪的各个开关。

表 A9-1　空燃比特性试验数据记录表

<table>
<tr><td colspan="4">内燃机型号</td><td colspan="9">试验名称：电控汽油机 x(r/min)空燃比特性试验数据</td></tr>
<tr><td colspan="4">大气压力</td><td>大气干温度</td><td colspan="6"></td><td colspan="2">试验日期</td></tr>
<tr><td colspan="4">燃油编号</td><td>汽油密度</td><td colspan="6"></td><td colspan="2">试验人员</td></tr>
<tr><td rowspan="2">内燃机参数</td><td colspan="2">转速/(r/min)</td><td>扭矩/(N·m)</td><td>点火角/(°)</td><td colspan="2">出水温度/℃</td><td>机油温度/℃</td><td>机油压力/kPa</td><td colspan="2">催化器空速/h^{-1}</td><td colspan="2">入口温度/℃</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td></td><td></td><td colspan="2"></td><td></td><td></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">序号</td><td colspan="2">空燃比 $(A/F)/10^{-6}$</td><td colspan="2">$CO/10^{-6}$</td><td colspan="2">$THC/10^{-6}$</td><td>$NO_x/10^{-6}$</td><td>$O_2/10^{-6}$</td><td colspan="4">CO_2/%</td></tr>
<tr><td>前</td><td>后</td><td>前</td><td>后</td><td>前</td><td>后</td><td>前</td><td>后</td><td>前</td><td>后</td><td>前</td><td>后</td></tr>
<tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

表 A9-2　起燃温度特性试验数据记录表

<table>
<tr><td colspan="4">汽油机型号</td><td colspan="9">试验名称：电控汽油机 x(r/min)起燃温度特性试验数据</td></tr>
<tr><td colspan="4">大气压力</td><td>大气干温度</td><td colspan="6"></td><td colspan="2">试验日期</td></tr>
<tr><td colspan="4">燃油编号</td><td>汽油密度</td><td colspan="6"></td><td colspan="2">试验人员</td></tr>
<tr><td rowspan="2">汽油机参数</td><td colspan="2">转速/(r/min)</td><td>扭矩/(N·m)</td><td>点火角/(°)</td><td colspan="2">出水温度/℃</td><td>机油温度/℃</td><td>机油压力/kPa</td><td colspan="2">催化器空速/h^{-1}</td><td colspan="2">空燃比 $(A/F)/10^{-6}$</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td></td><td></td><td colspan="2"></td><td></td><td></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">序号</td><td colspan="2">入口温度/℃</td><td colspan="2">$CO/10^{-6}$</td><td colspan="2">$THC/10^{-6}$</td><td colspan="2">$NO_x/10^{-6}$</td><td colspan="2">$O_2/10^{-6}$</td><td colspan="2">CO_2/%</td></tr>
<tr><td>前</td><td>后</td><td>前</td><td>后</td><td>前</td><td>后</td><td>前</td><td>后</td><td>前</td><td>后</td><td>前</td><td>后</td></tr>
<tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

9.8　试验及总结

（1）参照表 A9-1、表 A9-2 绘制试验数据表格，填写试验数据。

（2）分别画出汽油机排放污染物 CO、THC、NO_x、CO_2 随空燃比变化曲线。

（3）分别画出汽油机排放污染物 CO、THC、NO_x、CO_2 随起燃温度变化曲线。

（4）结合上述试验作出的曲线，分析各种排放污染物排放量随空燃比或起燃温度变化的规律及原因。

（5）分析在空燃比特性点中 CO、THC、NO_x 组成窗口的意义。

（6）分析在起燃温度特性点中 T_{50} 点（转化率为 50%）的意义。

（7）参照《环境保护产品技术要求——汽油车用催化转化器》（HJ/T 331—2006）分析三元催化器的老化方法。

试验 10　内燃机动态模拟试验

10.1　试验目的

在了解汽车内燃机稳态试验的基础上，进一步深入地理解内燃机动态模拟试验的必要性、试验技术和方法。运用动态模拟的方法，实现车辆的道路模拟试验。主要包含以下几个方面：

（1）了解动态试验台的功能、软件、硬件构成；

（2）在理解汽车原理的基础上建立数学模型，掌握试验软件的编制方法；

（3）结合一项具体的科研项目的应用，通过已知的整车模拟参数，进行实际的车辆道路模拟试验。

10.2　试验要求

（1）内容同试验 1 的 1.2 中（1）。

（2）认真阅读第 8 章，了解内燃机动态试验设备的原理及试验的基本条件。

（3）试验中，按指导教师的要求操作仪器设备，正确观测和记录数据，按步骤进行试验。

（4）试验后要求：认真撰写试验报告，正确处理试验数据并规范列出试验数据和计算结果表格，绘制有关曲线，结合原理对试验结果和动态特性曲线进行分析与讨论。

10.3　试验设备

（1）内燃机动态模拟试验台。

（2）APA 交流电力测功机。

（3）AVLS733 动态油耗仪。

（4）高速采集系统。

10.4 试验步骤

（1）设定试验参数：整车装备质量、最后总质量、主减速比、速比、车轮半径、迎风面积、风阻系数、滚动阻力。

（2）依次开启内燃机动态模拟试验台、APA 交流电力测功机、AVLS733 动态油耗仪和高速采集系统。

（3）起动内燃机，使内燃机处于正常状态。

（4）按给定程序进行内燃机动态试验。

（5）试验过程中，记录转速、扭矩、功率、实际车速、目标车速、加速踏板位置、挡位、加速时间、加速距离、坡度等参数。

（6）试验结束后将数据存盘。

（7）数据整理与分析讨论。

10.5 试验内容

（1）应用图、表组织试验。中国典型城市公交循环工况模拟程序如表 A10-1 所示，试验曲线如图 A10-1 所示。

表 A10-1 中国典型城市公交循环工况数据

循环次数	行驶时间 /s	行驶距离 /km	平均车速 /(km/h)	最高车速 /(km/h)	最高加速度 /(m/s²)	最大减速度 /(m/s²)	怠速时间 /s	怠速时间比例 /%
2	2628	11.6	15.9	60	0.914	1.543	762	29

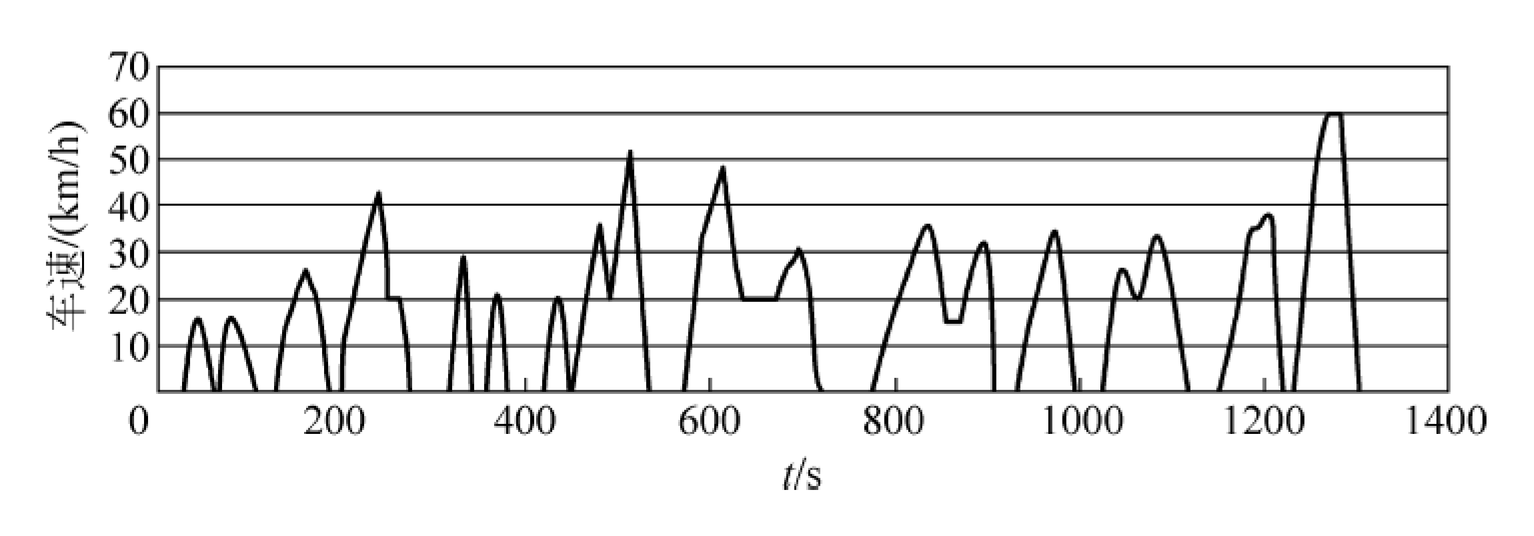


图 A10-1 中国典型城市公交标准循环工况

（2）编辑手动试验计划，实现车辆的起步换挡加速试验，控制方式由 N/A（内燃机转速/节气门开度）切换到 RG/V（道路阻力/车速）状态→手动挂 1 挡→迅速将目标车速调节到 40 km/h→实际车速由 0～25 km/h→换二挡加速至 40 km/h→减加速踏板至 0→变成空

挡→停车。

（3）编辑自动运行试验计划，实现车辆按预定工况进行行驶试验，表 A10-2 是其中一实例。

表 A10-2　车辆行驶工况数据

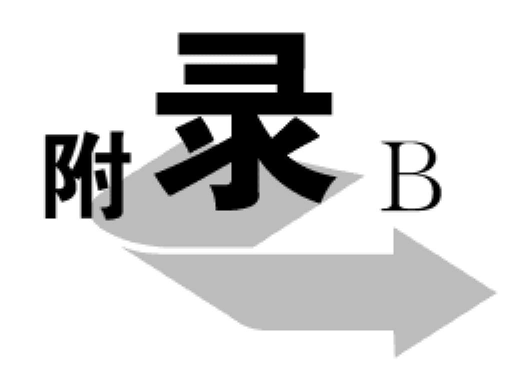
车速/(km/h)	时间/s	挡位	坡度/%
5	2	1	0
26	5	1	0
30	4	2	0
40	3	3	0
40	4	4	0
30	7	3	10
50	10	4	−5
10	5	1	8
5	2	1	0
停车	5	0	0

10.6　分析思考

（1）进行内燃机动态模拟试验的意义是什么？动态模拟试验与稳态试验、转鼓试验或道路试验比较有哪些特点？

（2）简述整车模拟试验在试验台上是如何实现的。

（3）根据设定的试验参数和实际测试的数据，对试验结果进行分析。



示功图画法简介

B.1 概述

示功图可有效地反映内燃机缸内工作过程，是研究和判断内燃机工作状态、放热规律、排放预测等的重要依据，因此，人们可以通过研究内燃机示功图来达到改善内燃机综合性能的目的。

B.2 示功图绘制方法

示功图的绘制方法主要有手工绘图法和软件辅助绘图法两种。

(1) 手工绘图法，也称为描点法。即在坐标纸上采用一一对应的方式进行描点连线从而绘制整个 p-φ 或 p-V 曲线。

(2) 软件辅助绘图法。用软件绘图的方法很多，如可以用 Excel、Origin、MATLAB 等各种数据处理软件进行绘图操作。下面以 MATLAB 为例简要介绍示功图的绘制方法。

B.3 数据预处理

在内燃机试验中，内燃机的热力过程具有不稳定性，即在一定的范围内无规律地变动，整个热力过程只是在宏观上达到稳定。试验中若仅有单个循环的压力曲线，是不具备可研究性的。因此，通常取若干个循环(10～20 个循环)的测试数据进行平均化处理，然后绘制 p-φ 图进行分析。

试验测试得到的内燃机示功图原始数据一般是曲轴位置 φ 和缸内压力 p。根据被测内燃机的物理参数，可计算出缸内容积 V 。

目前内燃机试验常常通过采集汽缸压力来分析缸内燃烧过程的一些特性。内燃机缸内压力测量的常用方法有机械法、电测法和计算机程控法。这些方法通常是通过旋转编码器测量曲轴转角，同时用缸压传感器测量相应的缸内压力。这就是 p-φ 图的测试数据来源。

在本校教学实践中，示功图试验测试数据通常以 Excel 形式给出，在 Excel 中直接进行平均化处理较为简便。以下以某次学生实际操作为例，给出一种数据预处理方案。

表 B-1 所示为某次试验数据，其中 A 列数据为曲轴转角 CrankAngle，C 列数据为各曲轴转角对应的压力值 p，第一行为数据名称，第二行为数据单位。此次试验中，每隔 0.375°曲轴转角取一次压力数据，共取得 15 个循环的压力数据，位于 3～28802 行，计 28800 组。为获得每一个曲轴转角对应的 15 个压力数值的平均值，需单独定义一列，即 Average 列（本例即 K 列）。预处理时，在 A3 格数据对应的 Average 格内（本例即 K3 格内）输入：

```
= IF(COUNTIF(A$3:A3,A3) = 1,AVERAGE(IF(A$3:A$28802 = A3,C$3:C$28802)),"")
```

再下拉命令格，依次用 A4、A5、…内的曲轴转角算出对应曲轴转角的循环压力平均值即可。

注：$ * 为绝对引用形式，无 $ 的 * 为相对引用形式。绝对引用和相对引用的区别在于公式中引用的单元格内容是否会随着输入公式的单元格位置不同而改变。

表 B-1　试验数据记录表格

SUM　=IF(COUNTIF(A$3:A3, A3)=1, AVERAGE(IF(A$3:A$28802=A3, C$3:C$28802)), "")

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	CrankAngle	n	P_Cyl_10	P_Cyl_2	P_Cyl_3	P_Cyl_4	P_Der_1	P_Der_2	P_Der_3	P_Der_4	P_Cyl_10_Average
2	° CA	Rpm	BAR	BAR	BAR	BAR	dp/d° CA	dp/d° CA	dp/d° CA	dp/d° CA	BAR
3	-360	1387.347	2.184357	-31.586	-31.586	-32.4047	0.545783	0	-0.27289	0	=IF(COUNTIF(A$3:
4	-359.625	1388.118	2.389025	-31.586	-31.7907	-32.4047	0.545783	0	-0.27289	0	2.340868073
5	-359.25	1387.347	2.593694	-31.586	-31.7907	-32.4047	0	0	0	0	2.41912378
6	-358.875	1387.347	2.389025	-31.586	-31.7907	-32.4047	0	0	0.272892	0.272892	2.352907413
7	-358.5	1387.347	2.593694	-31.586	-31.586	-32.2	-0.27289	0	0.545783	0	2.346887743
8	-358.125	1388.118	2.184357	-31.586	-31.3813	-32.4047	0	0	0.272892	0	2.304750055
9	-357.75	1387.347	2.593694	-31.586	-31.3813	-32.2	0.272892	0.272892	0	0	2.41912378
10	-357.375	1387.347	2.389025	-31.3813	-31.3813	-32.4047	-0.54578	-0.27289	-0.27289	-0.54578	2.395045101
11	-357	1220.703	2.184357	-31.7907	-31.586	-32.6093	0.545783	-0.27289	-0.27289	-0.27289	2.41310411
12	-356.625	1388.118	2.798363	-31.586	-31.586	-32.6093	0	0	-0.27289	-0.27289	2.340868073
13	-356.25	1375.138	2.184357	-31.7907	-31.7907	-32.814	-1.09157	0	0	0.818675	2.304750055
14	-355.875	1375.138	1.979688	-31.586	-31.586	-31.9953	0.272892	0.545783	0.545783	0.545783	2.280671376
15	-355.5	1375.138	2.389025	-31.3813	-31.3813	-32.4047	0.272892	0	0	-0.27289	2.41310411
16	-355.125	1375.894	2.184357	-31.586	-31.586	-32.2	0.272892	0	-0.27289	-0.54578	2.42514345
17	-354.75	1375.138	2.593694	-31.3813	-31.586	-32.814	-0.27289	-0.27289	0	-0.27289	2.286691045
18	-354.375	1375.138	1.979688	-31.7907	-31.586	-32.4047	-0.54578	-0.27289	0	1.091567	2.322809064
19	-354	1375.138	2.184357	-31.586	-31.586	-31.9953	0	0.545783	0	-0.27289	2.364946752
20	-353.625	1375.894	1.979688	-31.3813	-31.586	-32.6093	0.545783	0.272892	-0.54578	-0.54578	2.42514345
21	-353.25	1375.138	2.593694	-31.3813	-31.9953	-32.4047	0.545783	-0.27289	0.272892	0	2.322809064
22	-352.875	1375.138	2.389025	-31.586	-31.3813	-32.6093	-0.54578	-0.27289	0.818675	0.272892	2.268632036
23	-352.5	1375.138	2.184357	-31.586	-31.3813	-32.2	0	-0.27289	-0.27289	0.272892	2.268632036
24	-352.125	1375.894	2.389025	-31.7907	-31.586	-32.4047	0.545783	0.272892	-0.54578	-0.27289	2.346887743

上述命令也可缩减为

```
= IF(COUNTIF(A$3:A3,A3) = 1,AVERAGEIF(A:A,A3,C:C),"")
```

由于此次试验中共有 15 个循环数据，每个曲轴转角都会在数据表格中重复出现。以 −360°(CA)为例，该曲轴转角首次出现在 A3 单元格内。在其对应的 Average 格（即 K3 单

元格)内输入上述命令,即可计算出 C 列中对应 $-360°$(CA)的 15 个压力 p 的平均值；在 $-360°$(CA)第二次(即一个循环后的 A1923 格)出现后,K 列相应单元格显示为空,不需进行重复计算。操作过程可参考表 B-1 中的相关内容。

读者也可尝试使用 MATLAB 对测试数据进行预处理的方法。根据读者意愿选取 Excel 中的任一汽缸测试数据,然后将如表 B-2 所示的曲轴转角的一列以及读者所选取的缸压一列均粘贴到一个新的表格中,然后将前两行(也就是写着名称和单位的两行)删去(在左侧行号数字处右键点选删除),这样可以将得到的工作表整理成只有两列的格式,如表 B-3 所示。

表 B-2 第二种导出数据范例

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	X axis	Pcy1rAve	Pcy1_A	Pcy2rAve	Pcy2_A	Pcy3rAve	Pcy3_A	Pcy4rAve	Pcy4_A	d(
2	deg	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	%
3	0	-1.90561	-1.90561	1.113251	1.113251	1.100457	1.100457	-0.28104	-0.28104	
4	0.4	-2.63475	-2.63475	1.138825	1.138825	1.126041	1.126041	-0.345	-0.345	
5	0.8	-1.96957	-1.96957	1.113251	1.113251	1.151625	1.151625	0.44809	0.44809	
6	1.2	-1.99516	-1.99516	1.113251	1.113251	1.202792	1.202792	-0.05078	-0.05078	
7	1.6	-2.12308	-2.12308	1.126038	1.126038	1.19	1.19	-0.07639	-0.07639	
8	2	-2.36612	-2.36612	1.100449	1.100449	1.164416	1.164416	0.44809	0.44809	
9	2.4	-0.0636	-0.0636	1.138825	1.138825	1.241167	1.241167	2.737824	2.737824	
10	2.8	-1.64978	-1.64978	1.100449	1.100449	1.19	1.19	2.891327	2.891327	
11	3.2	-0.75435	-0.75435	1.151627	1.151627	1.202792	1.202792	3.492523	3.492523	
12	3.6	-1.96957	-1.96957	1.113251	1.113251	1.151625	1.151625	3.159943	3.159943	
13	4	-2.35333	-2.35333	1.036499	1.036499	1.113249	1.113249	2.929688	2.929688	
14	4.4	-2.16145	-2.16145	1.151627	1.151627	1.087666	1.087666	2.955292	2.955292	
15	4.8	-1.29161	-1.29161	1.100449	1.100449	1.215584	1.215584	3.671631	3.671631	
16	5.2	-2.51962	-2.51962	1.113251	1.113251	1.279543	1.279543	2.673859	2.673859	
17	5.6	-1.95678	-1.95678	1.164414	1.164414	1.253959	1.253959	3.326233	3.326233	
18	6	-1.79049	-1.79049	1.151627	1.151627	1.202792	1.202792	3.607666	3.607666	
19	6.4	-1.39394	-1.39394	1.023712	1.023712	1.202792	1.202792	3.492523	3.492523	
20	6.8	-1.86724	-1.86724	1.100449	1.100449	1.100457	1.100457	3.095978	3.095978	
21	7.2	-2.03353	-2.03353	1.202789	1.202789	1.151625	1.151625	2.571533	2.571533	
22	7.6	-2.05912	-2.05912	1.1772	1.1772	1.087666	1.087666	2.571533	2.571533	

表 B-3 对数据进行初步处理后的结果

	A	B
1	0	-1.9056149
2	0.4	-2.6347485
3	0.8	-1.969574
4	1.2	-1.9951591
5	1.6	-2.1230755
6	2	-2.3661213
7	2.4	-0.0635967
8	2.8	-1.6497803
9	3.2	-0.7543545

然后选择“另存为”选项,将储存格式选为 csv(逗号分隔符)格式,便于后续的处理。读者可以使用记事本打开 csv 文件,观察 csv 文件结构。csv 的全称是逗号分隔值,其中的数据都是用逗号进行分割,是一种纯文本的文件,通用性强,易于处理。

更多的数据预处理方法,读者可参阅相关文献进行尝试。

B. 4　数据处理

1. 数据导入

完成数据预处理后，即可将预处理得到的压力均值数据导入 MATLAB，进行绘图操作。

本示例中，简要地将负荷状况分为纯压缩、小负荷、中负荷、大负荷四种。读者可依据试验具体情况进行调整。

图 B-1 和图 B-2 所示为导入数据简要过程，供读者参考。



图 B-1　MATLAB 导入数据快捷键

选择工具栏中的“导入数据”选项，在弹出的选择框内选择要导入的 Excel 文件，打开后选择要导入的数据列，如图 B-2 所示，再单击“导入所选内容”即可。

如果在数据预处理中使用了 MATLAB 的方法，没有在 Excel 中进行处理，则可使用下面的方法对数据进行平均处理。

为得到每个转角对应的 n 个循环内缸压的平均值(通常 n 取 10 或 15)，首先要将 csv 文件导入 MATLAB，使用 MATLAB 的 importdata 函数。以下面的语句为例：

```
RAWdata1 = importdata('20171026_pedal0.csv');
```

这一句的作用是将我们处理好的 20171026_pedal0. csv 文件导入 MATLAB 并赋值给 RAWdata1，为了获得转角对应的平均(对多次循环的平均)缸内压力，可将发动机一个循环的数据存入一列，下一个循环存入下一列，最后得到一个列数为 10 或 15 的矩阵，然后直接使用 mean 函数取多次循环的平均。

下面给出了具体的实现过程，新建一个 getP. m 文件，将下面的内容输入到这个文件中，这个文件保存之后便可以在其他程序中使用 getP(rawdata) 函数。这个函数的输入是

图 B-2 MATLAB 导入数据操作

使用 importdata 函数得到的矩阵，输出是转角对应的平均缸压。注意程序中的 n 可以自己设定。

具体实现过程如下所示：

```
function P = getP(RAWdata)
h = 1800; % 一个循环有 1800 个点，即为 720/0.4
n = 10; % 取的圈数
data = zeros(h,n);
for i = 1:n
    % 将第 i 圈的数据存入第 i 列，一共取 10 圈
    data(:,i) = RAWdata(h * (i - 1) + 1:h * i,2);
end
% 取各圈的平均，其中 mean 函数中的 2 是指求每一行的均值
P = mean(data,2);
end
```

基于上述小程序，读者便可以获得一个一列的矩阵，其数值为多次循环的平均缸压，每一个缸压值对应的角度就是 RAWdata 中第一列的第一组角度。之后使用 plot 数据可以得到缸压-转角的曲线。

2．MATLAB 曲线绘制

1）命令简介

（1）plot 命令

plot(x,y,'. b')%表示以 x 为横坐标、y 为纵坐标作图，'. '表示实心菱形标记符，'b'表示蓝色，若命令写成 plot(x,y)则默认为蓝色实线无标记符。

表 B-4 示出了 plot 命令绘制的线型、标记符和颜色及对应的控制符。MATLAB 的版本不同，具体的控制符会有一定差异。此外，设置曲线线型、标记符和颜色三项属性时，控制符的顺序不受限制并可以省略或者部分省略。也就是说'r—. * '、'—. r * '、' * —. r'等形式是等效的。读者可依据作图实际需要进行选择。

表 B-4　plot 命令控制符

线型	说明	标记符	说明	颜色	说明
—	实线(默认)	+	加号符	r	红色
——	双划线	o	空心圆	g	绿色
:	虚线	*	星号	b	蓝色
—.	点划线	.	实心菱形	c	青绿色
		x	叉号符	m	洋红色
		s	空心正方形	y	黄色
		d	空心菱形	k	黑色
		^	上三角形	w	白色
		v	下三角形		
		>	右三角形		
		<	左三角形		
		p	五角星		
		h	六边形		

（2）title 命令

title('纯压缩 p-φ 曲线') %表示在图线上方添加图线名称，如此次命名为“纯压缩 p-φ 曲线”。

（3）label 命令

该命令用于添加轴标签，如：

xlabel('曲轴转角 φ/(°CA)')

ylabel('缸内压力 p/bar')

2）p-φ 曲线绘制

在作纯压缩 p-φ 图时，可参考如下代码：

```
plot(Crankangle,p_chunyasuo)
title('纯压缩 p-φ 曲线')
```

xlabel('曲轴转角 φ/(°CA)')

ylabel('缸内压力 p/bar')

即可得到纯压缩情况下的 p-φ 曲线，如图 B-3 所示。各不同负荷下或不同转速下同理。

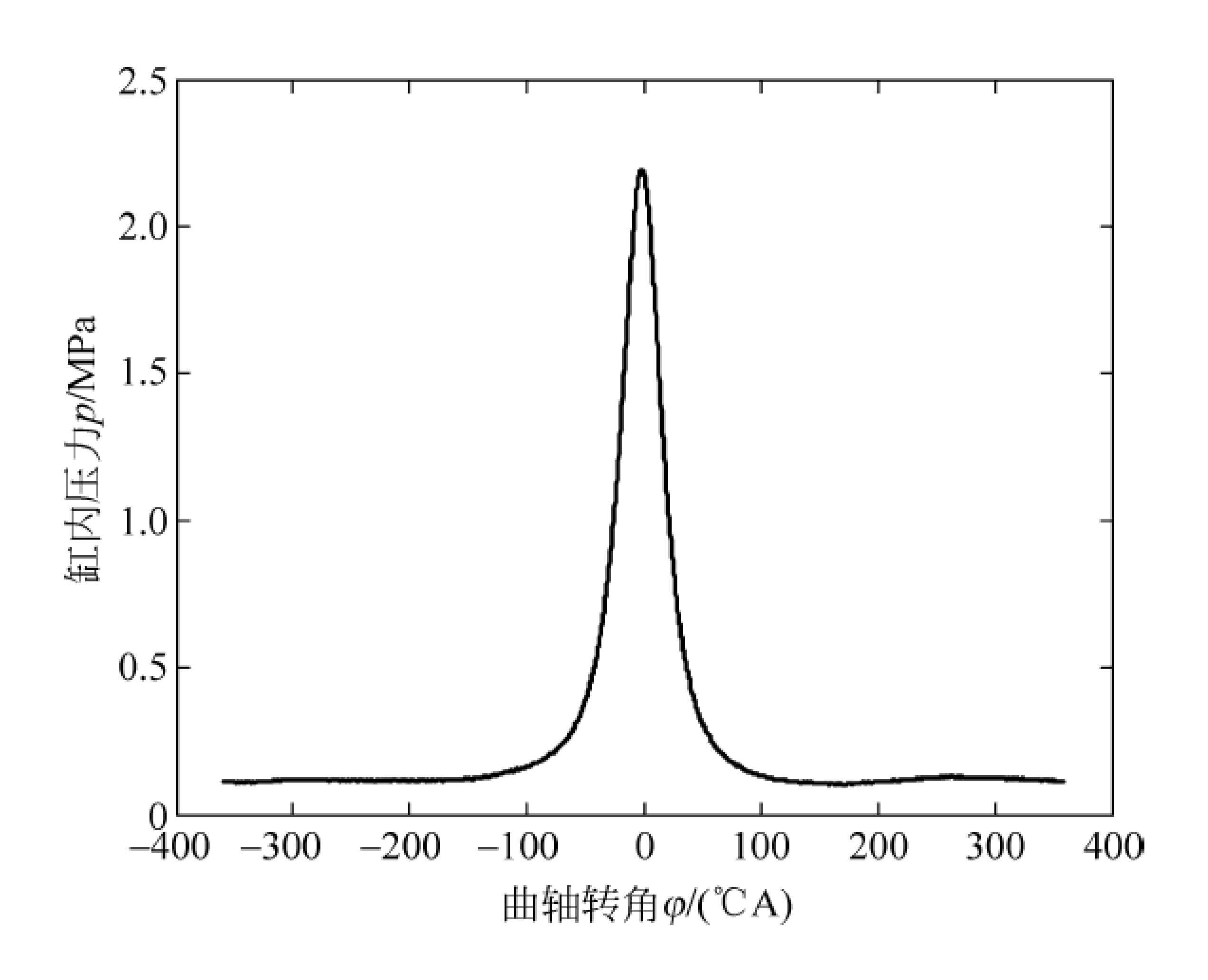


图 B-3 纯压缩 p-φ 曲线

为了对不同负荷下的压力大小有一个直观的认知，通常会将不同负荷下的 p-φ 曲线画在一张图上，该操作需要以下两个命令。

(1) hold on 命令

在 plot 命令之后使用，作用为保持原图线不变，在原图线的基础上再次作图。

(2) legend 命令

添加曲线图例方法：

legend('纯压缩线')；%使用 legend 命令添加曲线图例，并可依曲线绘制先后顺序添加多个不同特点的曲线图例，用逗号隔开，如 legend('纯压缩线','小负荷线')；

所得图线如图 B-4 所示。

曲线绘制完成后，需确定上止点，同时需将上止点对应的曲轴转角设为零点，便于进一步的数据分析。

3) 根据 p-φ 曲线确定上止点

活塞在汽缸里作往复直线运动时，当活塞向上运动到最高位置，即活塞顶部距离曲轴旋转中心最远的极限位置，称为上止点。准确测定上止点位置对于测定内燃机正时和数据修正等具有重要意义。因此，我们在获得 p-φ 曲线后，通常首先进行上止点的测定。

在这里，可用两种不同的做法来进行数据处理。一种为拟合数据，一种为直接处理，下面将分别介绍在求上止点时的应用方法。

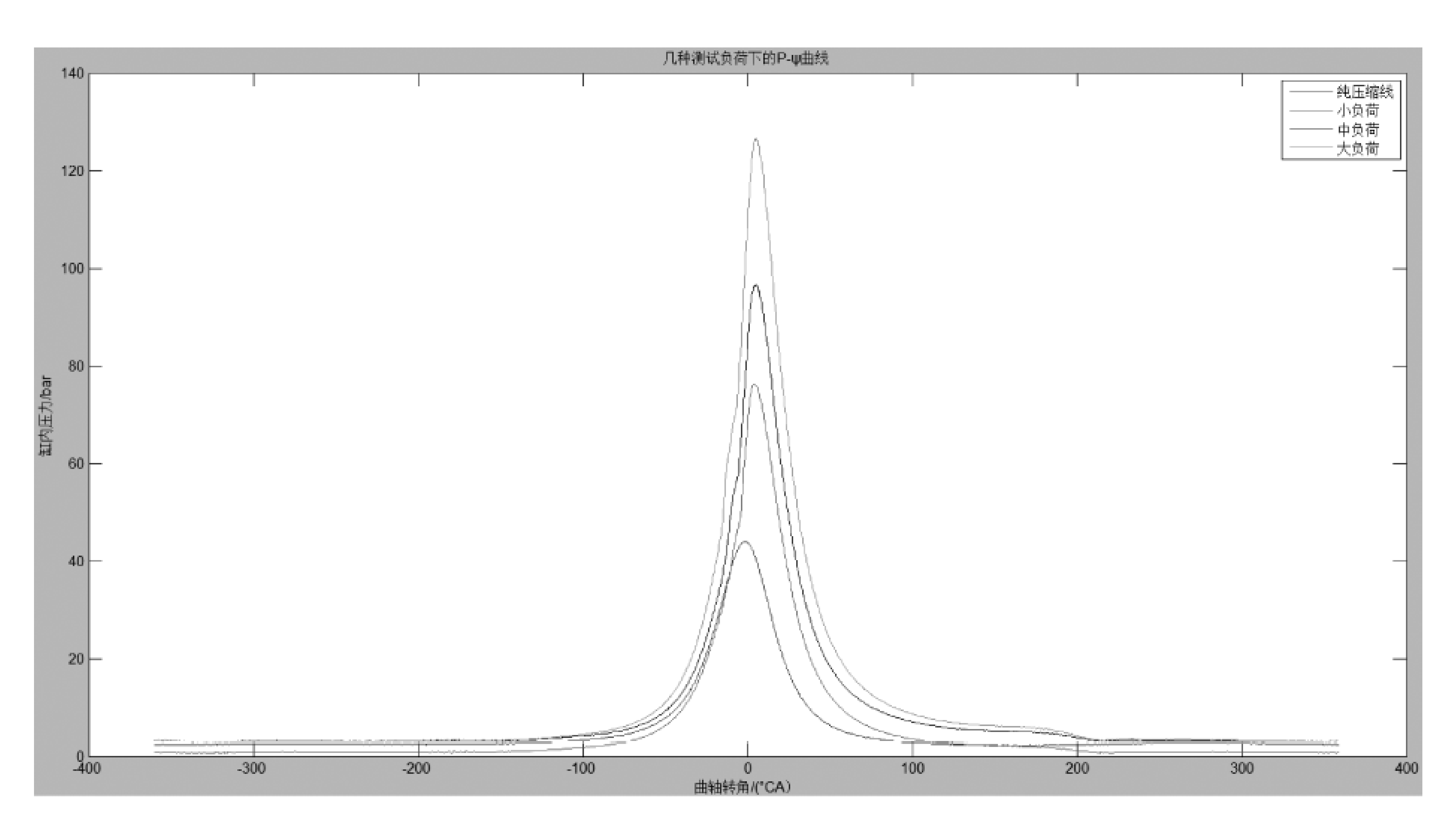


图 B-4　几种测试负荷下的 p-φ 曲线

（1）拟合数据测定上止点

在命令行输入 cftool 后，拟合工具栏会弹出如图 B-5 所示的画面。

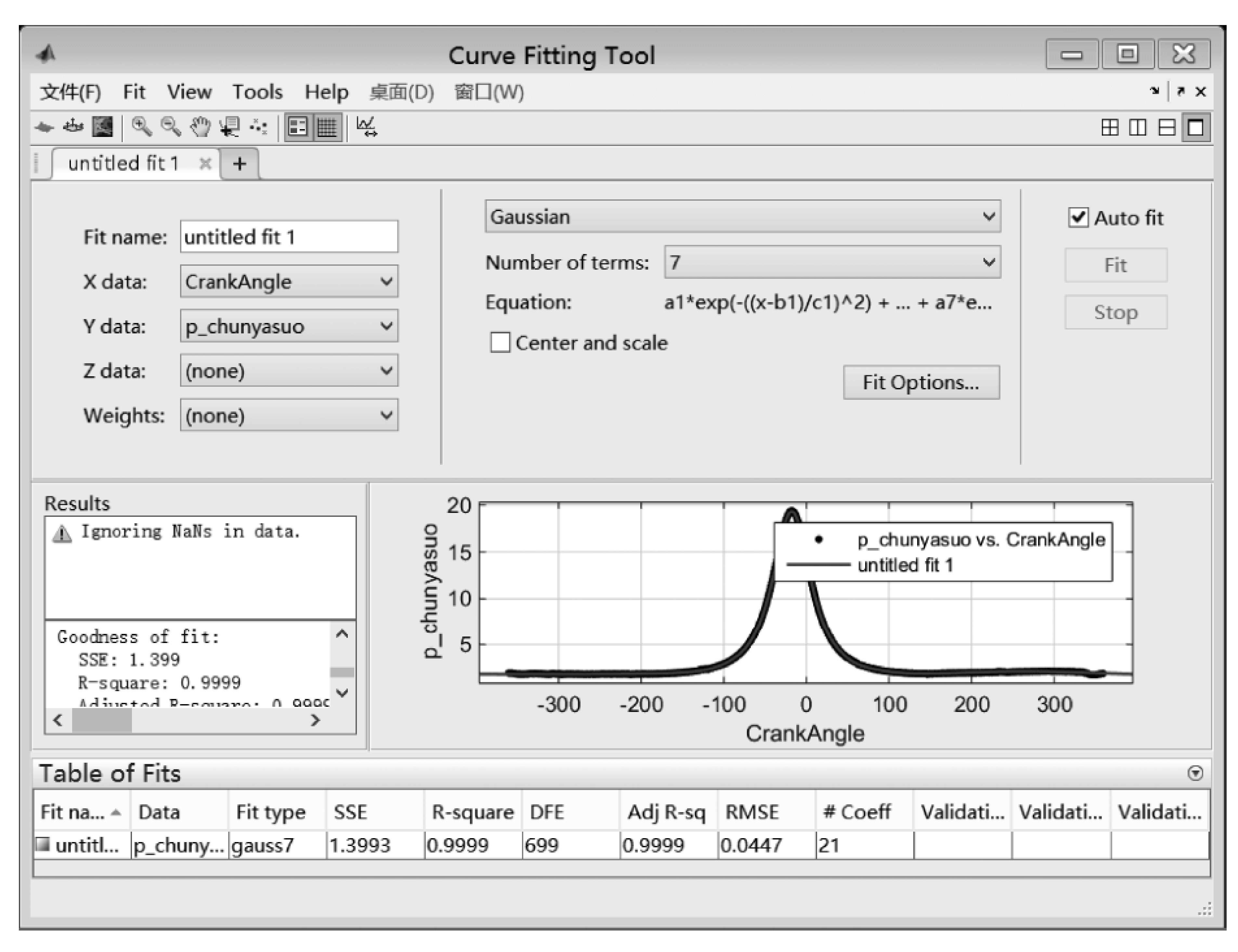


图 B-5　曲线拟合工具栏

选择适当的拟合方式，使拟合优度判定系数 R^2 达到理想值(一般为 0.9997～0.9999)，再使用拟合出的曲线重新画图，参考代码如下：

```
plot(x,y,'r')
hold on
for i = [14:0.25:19]
line([ - 360,360],[i,i]) % 在 - 360°至 360°曲轴转角范围内画平行于 x 轴的直线
hold on
end
m = 0
for m = 0:1:20
y0 = 14 + 0.25. * m
delta_y = y - y0 % 此时 delta_y 定义了 y 与 y0 的差值,目的为在每条直线上寻找差值为零的点
j = 1
for k = 1:length(x) - 1
if delta_y(k) * delta_y(k + 1)<0
position(j) = k + 1
j = j + 1
end
end
hold on
plot(x(position),y(position),'ro')
x(position) % 将得到的交点 x 坐标输出
Avex(m + 1) = mean(x(position))
Avey(m + 1) = mean(y(position))
m = m + 1
end
hold on
plot(Avex,Avey,'k') % 对各直线交点坐标平均值进行线性拟合
title('纯压缩线')
xlabel('曲轴转角/(°CA)');ylabel('缸内压力')
```

所得结果如图 B-6 所示。

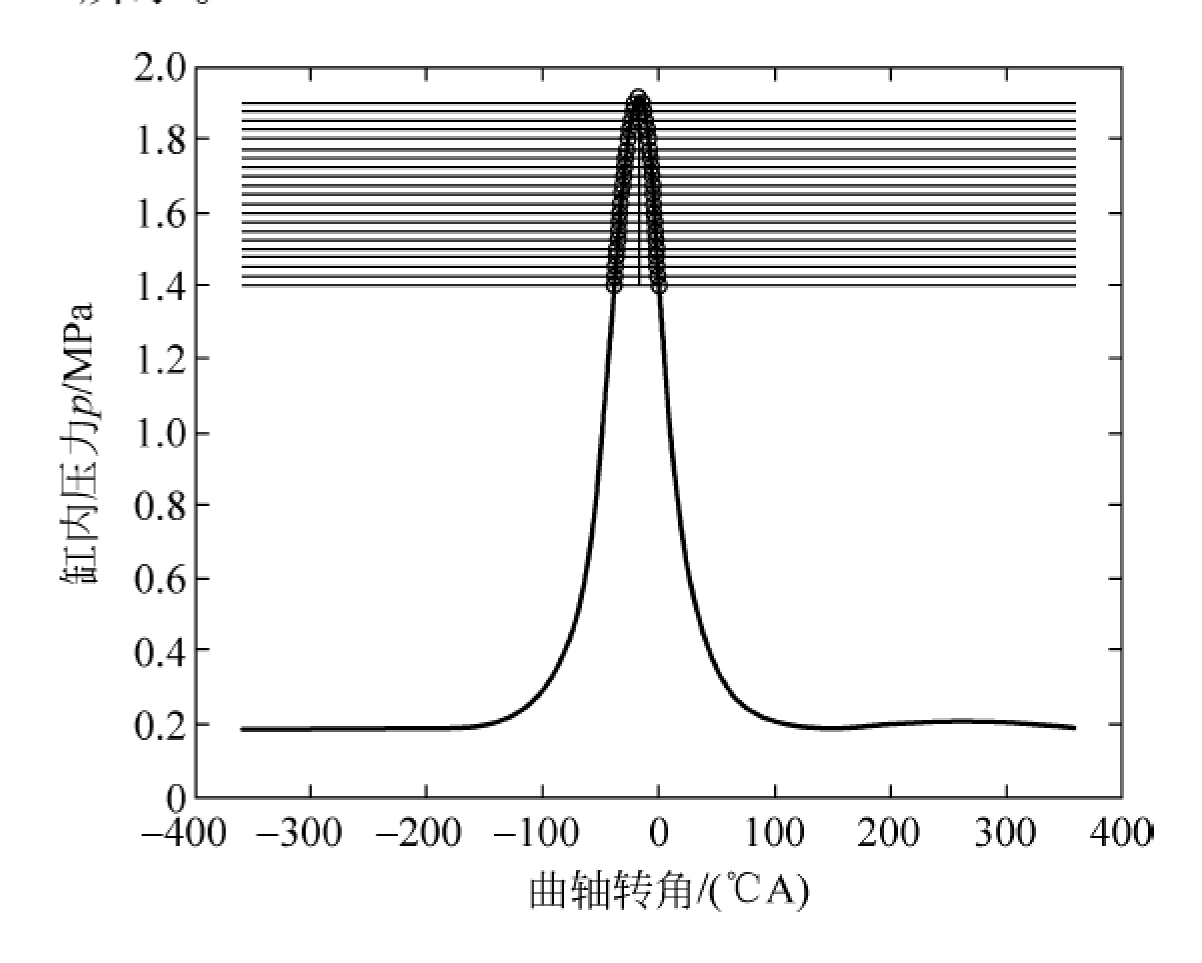


图 B-6 拟合数据法测定上止点图线处理

根据 polyfit 拟合出的 Avex 和 Avey 曲线与 x 轴的交点，即可得到上止点对应的曲轴转角。

(2) 直接处理法测定上止点

直接处理的方法不再进行曲线的拟合，而是在原本曲线的基础上进行操作。

同样的，也需要在曲线上增加平行于 x 轴的直线：

```
for i = [14:0.25:19]
line([ - 100,100],[i,i])
hold on
end
```

然后用[xi,yi]=ginput(2)对原图线与水平线取交点，这一步较为繁杂，且需手动取点。取点后输入取得点的坐标，进行一阶线性拟合，得到的直线与 x 轴的交点即为所求的上止点对应的曲轴转角。

对纯压缩和各负荷及转速下的曲线进行处理，可得到不同情况下的上止点对应的曲轴转角，可试比较之。求其平均值是一个减小误差的方法。

在求出上止点对应的曲轴转角后，可对曲轴转角 CrankAngle 进行统一修正。

读者可参考相关文献尝试其他方法。

4) 着火始点及其他特征点判断(含 $\mathrm{d}p/\mathrm{d}\varphi$、$\mathrm{d}q$-$\mathrm{d}\varphi$ 曲线作法)

在进行着火始点等重要特征点判断时，有根据 p-φ 曲线、$\mathrm{d}p$-$\mathrm{d}\varphi$ 曲线、$\mathrm{d}q$-$\mathrm{d}\varphi$ 曲线等几种不同的方法，读者可以分别尝试，并作数据比较和精度判断。

(1) 根据 p-φ 曲线判断着火始点

以小负荷为例，作出小负荷和纯压缩情况下的 p-φ 曲线，绘图代码如下：

```
plot(CrankAngle,p_chunyasuo,'r')
hold on
plot(CrankAngle,p_xiaofuhe)
title('小负荷 p-φ 曲线')
xlabel('曲轴转角/(°CA)')
ylabel('缸内压力')
legend('纯压缩','小负荷')
```

根据上述绘图操作命令，得到如图 B-7 所示的小负荷和纯压缩情况下的 p-φ 曲线。压力开始脱离纯压缩线的点即为着火始点。

为使描述更为直观，可采用两数据相减的方法，即

```
plot(CrankAngle,p_xiaofuhe - p_chunyasuo,'r')
line([ - 360,360],[0,0]) % 作一条直线 y(纵坐标) = 0,以使小负荷与纯压缩曲线的交点所代表的
压差零点更为明显
title('小负荷 p-φ 曲线差');
xlabel('曲轴转角/(°CA)');ylabel('缸内压力');
```

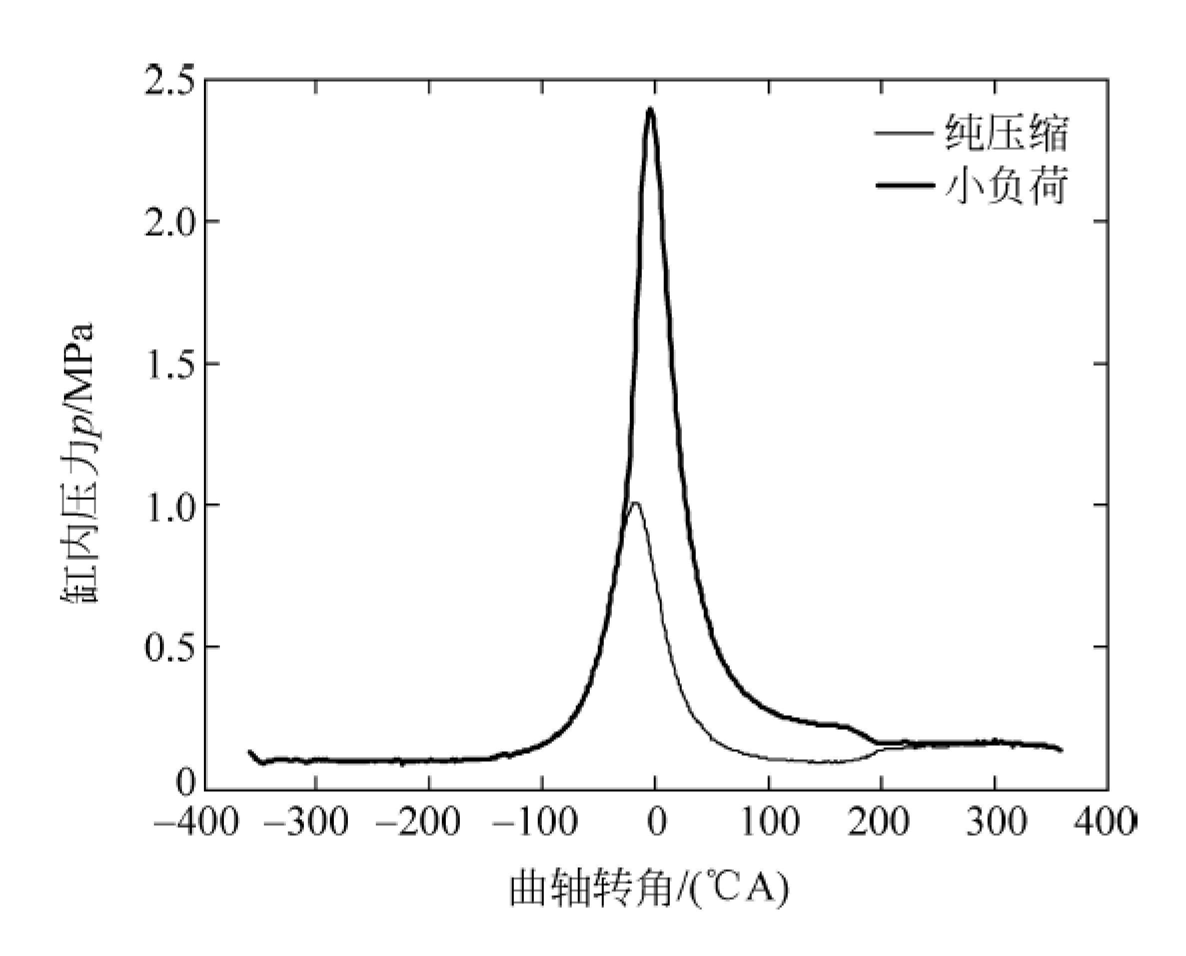


图 B-7 小负荷与纯压缩 p-φ 曲线

得到图 B-8 所示结果。

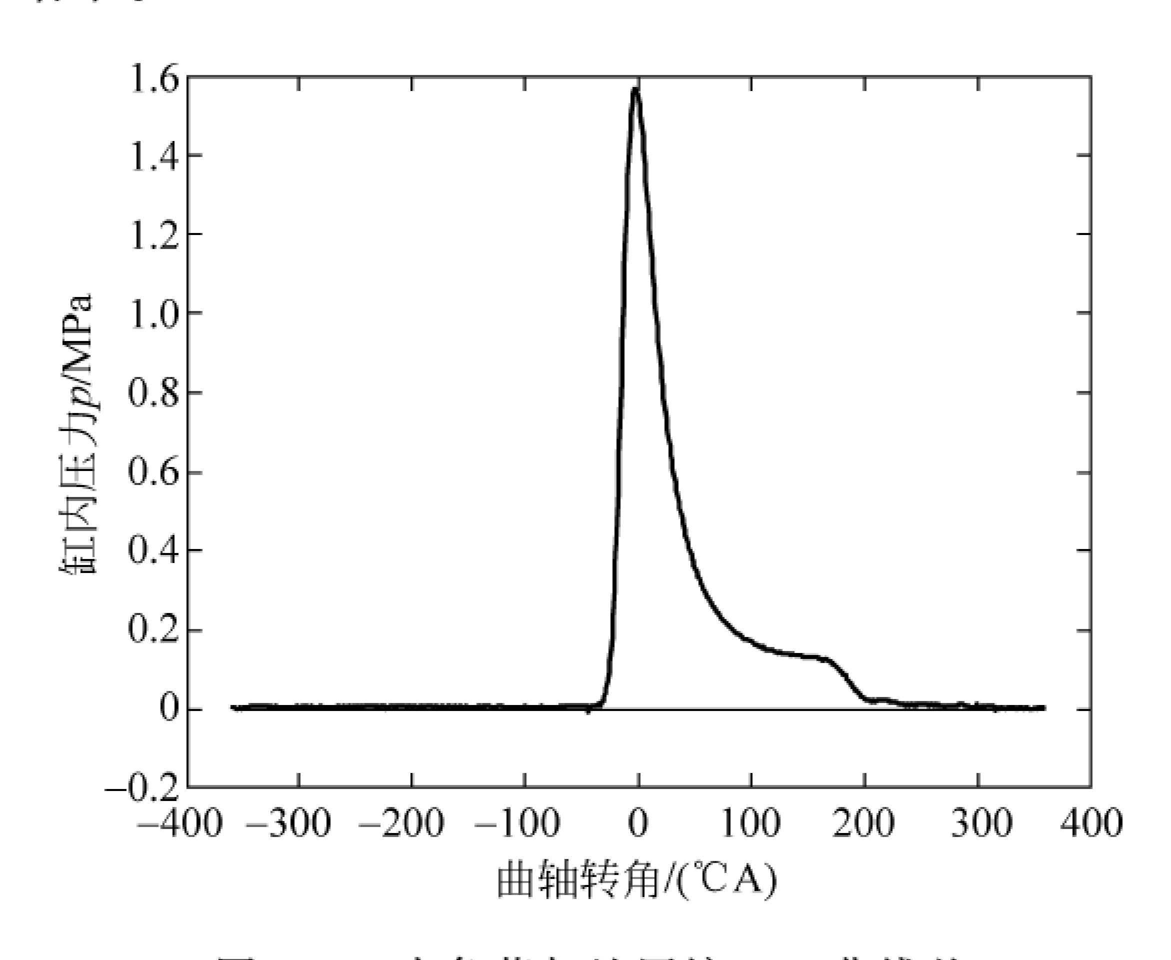


图 B-8 小负荷与纯压缩 p-φ 曲线差

可用 data cursor 进行放大取点，确定交点所在位置。

燃烧末期的判断同理。

(2) 根据 dp-dφ 曲线判断着火始点

对数据进行微分可以使用 diff 和 gradient 两种命令。但确切来说，两种命令的原理不同，所得的结果也不同。diff 命令为使用差分的方法来求导数，由于差分是针对离散情况如离散向量、数字图像等来讲的，而导数是针对连续函数来讲的，这两种情况都可以用 diff 函数来求。又因为用后一行减去前一行的量，所得的矩阵会比原矩阵少一行；而 gradient 命令为求导，所得矩阵与原矩阵行数相同，一般适用于连续函数，在数据拟合曲线后使用较为方便。

以下给出示例：

```
Z_chunyasuo = diff(p_chunyasuo)./diff(CrankAngle);
Z_xiaofuhe = diff(p_xiaofuhe)./diff(CrankAngle);
```

或

```
Z_chunyasuo = gradient(p_chunyasuo)./gradient(CrankAngle);
Z_xiaofuhe = gradient(p_xiaofuhe)./gradient(CrankAngle);
```

注：矩阵运算应使用./或.*等形式，而非/或*。

而后分别进行绘图可得类似图 B-9 的图线。

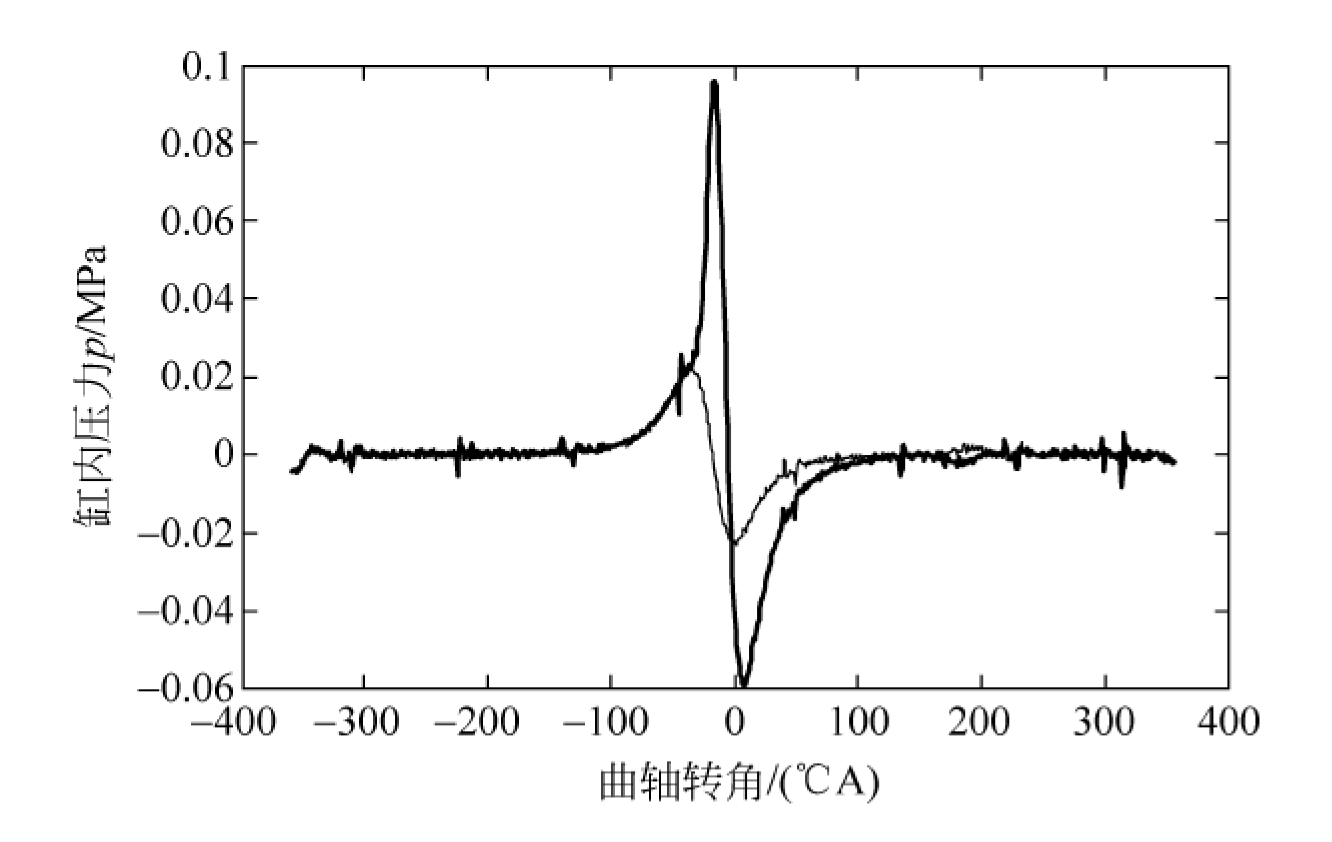


图 B-9　小负荷与纯压缩 dp-dφ 曲线

同样，由于要找的数据点不够直观，因此可以使用(1)中的方法，使两线相减，得到与图 B-10 类似的曲线。

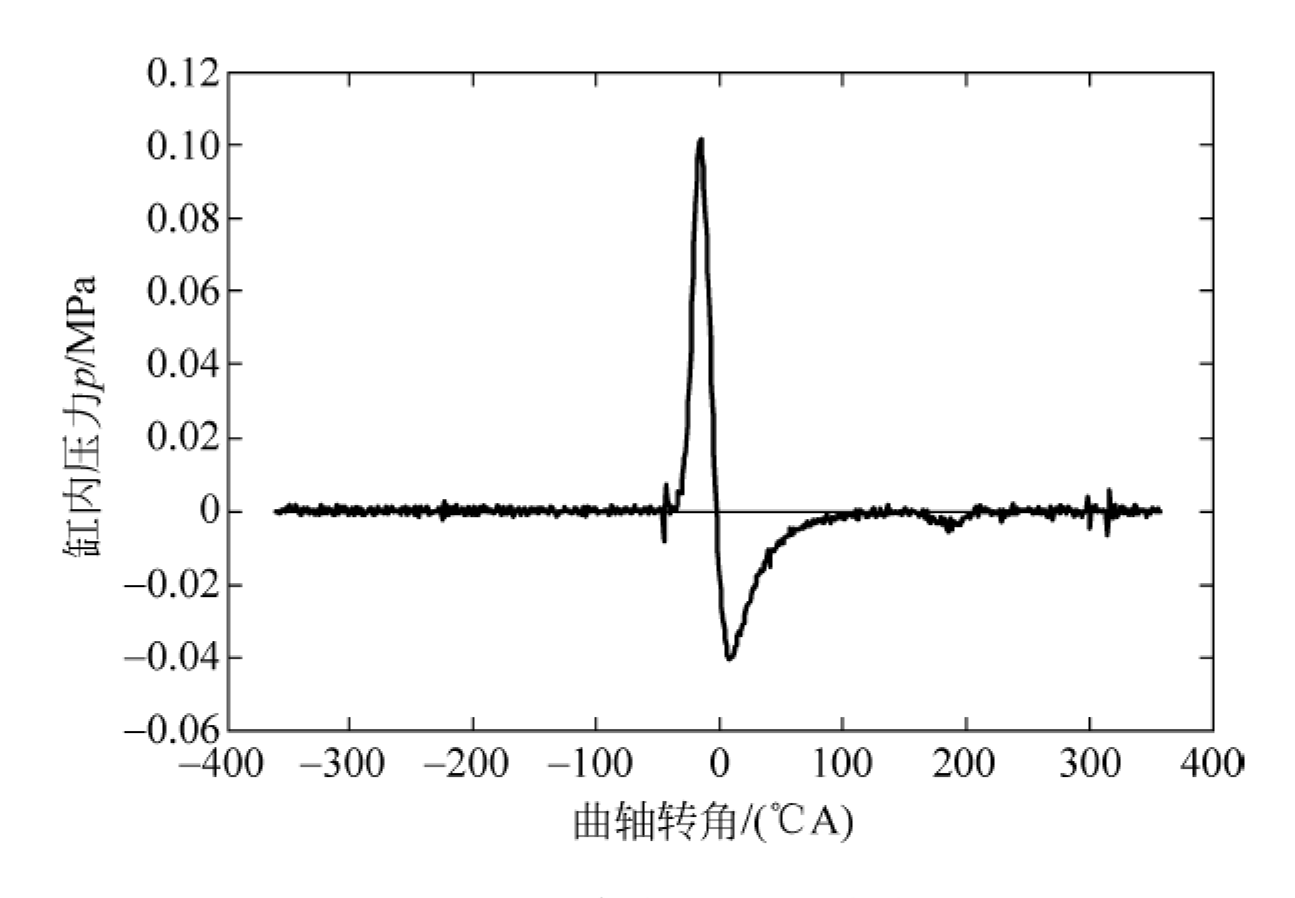


图 B-10　小负荷 dp-dφ 曲线差

再使用 data cursor 进行取点即可。燃烧末期等的判断同理。

(3) 根据 $\mathrm{d}q$-$\mathrm{d}\varphi$ 曲线判断着火始点

放热率曲线根据下面公式求得：

$$\frac{\mathrm{d}Q_{\mathrm{B}}}{\mathrm{d}\varphi}=\left[\frac{1}{k-1}\left(V\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}\varphi}+kp\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}\varphi}\right)-\frac{pV}{(k-1)^2}\frac{\mathrm{d}k}{\mathrm{d}\varphi}\right]+\alpha_t F_{\mathrm{w}}(T-T_{\mathrm{w}})$$

本试验中，取 k 为某常数值，所以 $\frac{pV}{(k-1)^2}\frac{\mathrm{d}k}{\mathrm{d}\varphi}=0$。但需要注意的是，在试验中，$k$ 实际并不是一个常量，k 的取值对放热量和放热率的影响此处不述。读者如有兴趣，可进行相关方面的课外阅读。

工程应用上，$\alpha_t F_{\mathrm{w}}(T-T_{\mathrm{w}})$ 很小，可以忽略，所以放热速率的表达式变为

$$\frac{\mathrm{d}Q_{\mathrm{B}}}{\mathrm{d}\varphi}=\frac{1}{k-1}\left(V\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}\varphi}+kp\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}\varphi}\right)$$

式中

$$\begin{aligned}V&=V_{\mathrm{c}}\left[1+\frac{\left(l+r-r\cos\varphi-\sqrt{l^2-(r\sin\varphi)^2}\right)}{d_{\min}}\right]\\&=V_{\mathrm{c}}\left[1+\frac{\varepsilon-1}{2}\left(R+1-\cos\varphi-\sqrt{R^2-\sin^2\varphi}\right)\right]\end{aligned}$$

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}\varphi}=V_{\mathrm{c}}\frac{\varepsilon-1}{2}\left(\sin\varphi+\frac{\sin\varphi\cos\varphi}{\sqrt{R^2-\sin^2\varphi}}\right)$$

式中：V_{c} 为压缩上止点时燃烧室和余隙之间的缸内容积；压缩比为 ε；l 为连杆长度；r 为曲柄长度；$R=\frac{l}{r}$。

由此进行计算即可得到相应的放热曲线，判断着火始点方法同上。

其他特征点的判断方法与着火始点类似。

B.5 试验曲线优化方法

试验过程中因试验环境及多种因素的影响，时常会出现波动较大的试验数据，为有效分析试验结果，需对试验数据进行处理，其处理方法主要有拟合曲线和直接处理两种。两种方法整理的数据曲线波动性不同。

使用拟合曲线法获取的曲线一般来说波动较小，曲线较平滑，但由于第一步处理即脱离了原始试验数据，可能会影响试验结果分析的准确性；使用直接处理法获得的曲线由于原始试验数据的波动性，可能会出现波动及异常数据，为此，需采取去噪和有效滤波，进而获得有效试验曲线。其方法可使用 filter、smooth、medfilt 等命令。

以下仅对 medfilt 命令进行简要介绍。

medfilt 命令是利用中值滤波来消除噪声的，对尖峰脉冲的消除很有效果。中值滤波的原理：对于一串连续输入的信号(量化后是一组数据)重新计算每一个 x 的输出值 y，不妨

定义为 $y = \text{new}(x)$，new 的操作是以 x 为中心，从长度为 $2k$ 的原信号中（区间为$[x-k+1, x+k]$），提取出这段区间内中间的那个值，作为 $y=\text{new}(x)$的结果。

使用形式为：

M＝medfilt1(p_chunyasuo,4) %定义新变量 M，对原数据进行 $n=4$ 的区间划分，提取中值。

需要注意的是，n 越大，噪声消除效果也就越明显，但 n 过大会造成原始数据丢失过多，使曲线对实际情况的符合程度降低，同时可能造成峰值损失。



试 验 报 告

柴油机台架试验报告

文档编号：

试验单位：

时间：

试验单位				编号	
				适用产品型号	
		批准：		日期：________	
编制	校对	审核	标审	审定	产品研发部
工程技术部	生产制造部	质量管理部	经营管理部	市场部	顾客代表

更改单号	签字	日期	

文件分发单位

单位	数量	单位	数量	单位	数量
产品研发部		经营管理部		质量管理部	
工程技术部		市场部		生产制造部	
存档					
分发人姓名：					

目　　录

1. 试验地点

北京某油泵油嘴股份有限公司产品研究院 AVL 试验台架。

2. 试验对象及基本参数

试验对象为 YN38CRD2 柴油机,其参数如下表所示:

柴油机型号	YN38CRD2
柴油机型式	直列,水冷,四冲程
燃烧室型式	直接喷射式
汽缸数-缸径×冲程	4-100×105
活塞总排量/L	3.298
进气方式	增压中冷
燃油喷射系统	Bosch 共轨泵
发火顺序	1—3—4—2

3. 试验室主要测量设备

主要设备见下表:

设 备 名 称	测 量 项 目
电涡流测功系统 ASM 315 SX 490/1.9-7.5 PIC08(AVL 测功机)	集中测量柴油机主要工作参数,如转速、扭矩、功率、中冷前后温度、压力、水温、排温、进气压力、机油温度等
AVL 油耗仪	油耗
AVL 五气体排放分析仪	测量柴油机气体排放物(HC、CO、NO_x)浓度
AVL 不透光烟度计	不透光烟度
空气流量计	空气流量

4. 试验内容

4.1 柴油机相位的检查

4.1.1 试验目的

验证相位是否同步成功,正确判缸。

4.1.2 试验过程

(1) 用示波器看柴油机的相位状态,要明确曲轴和凸轮轴的齿数以及相互位置关系,如图 C-1、图 C-2 所示。

(2) 按照软件说明文档对曲轴和凸轮轴进行标定,如图 C-3 所示。

(3) 拖动柴油机转速达到 60 r/min 以上;监控转速信号 Eng_nAvrUW、曲轴信号处理状态 CrkDrv_stSigNewUB、凸轮轴转速处理状态 CamDrv_stSigNewUB、同步状态 InjDrv_stOpModeUB,如图 C-4 所示。

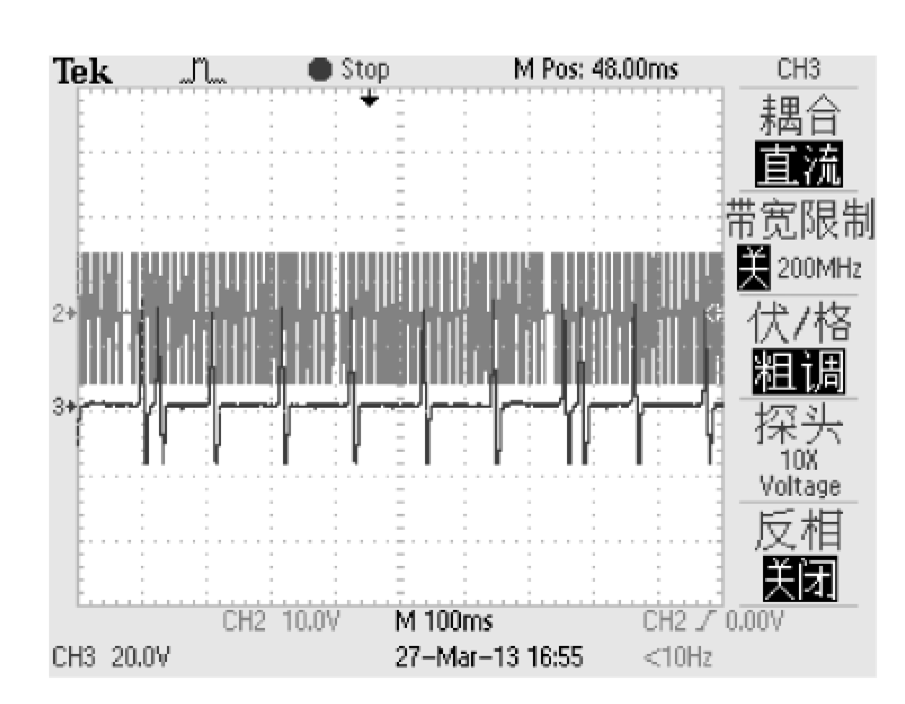


图 C-1 曲轴相位信号与凸轮轴相位信号对应关系

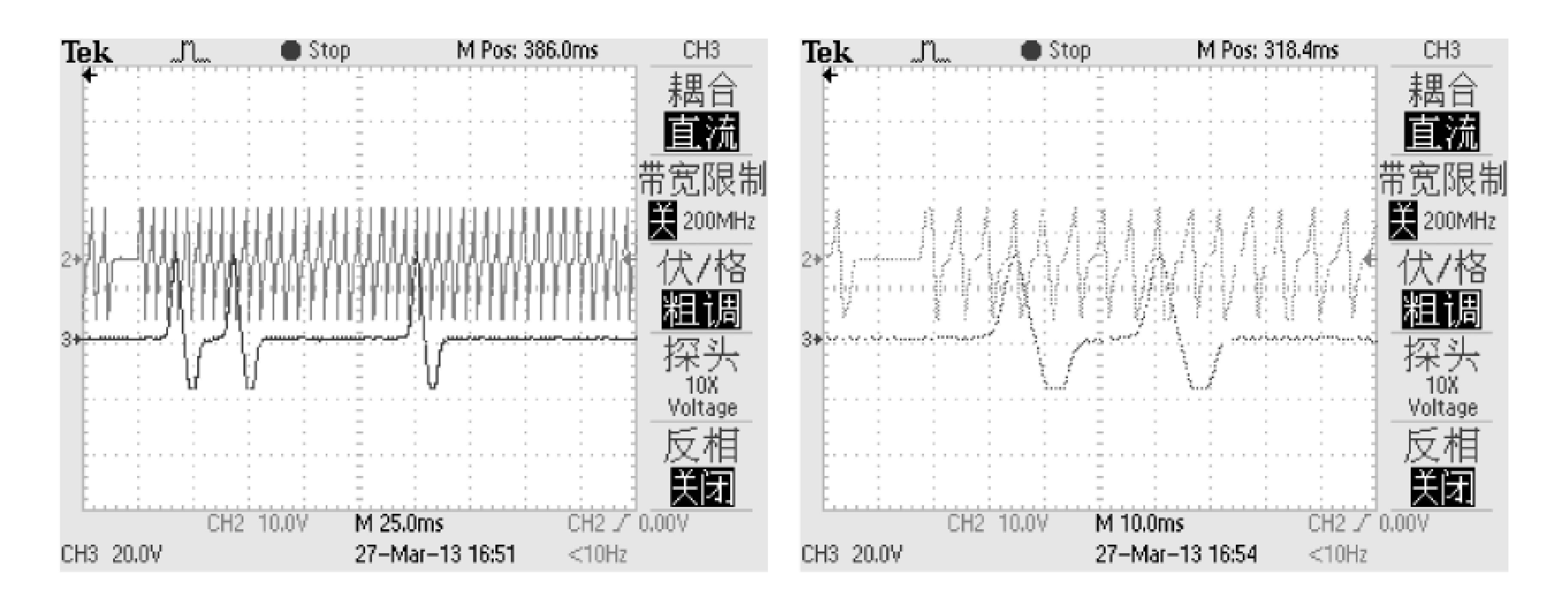


图 C-2 曲轴相位信号与凸轮轴相位信号对应关系(凸轮轴特殊齿局部放大)



图 C-3 曲轴、凸轮轴标定示意图

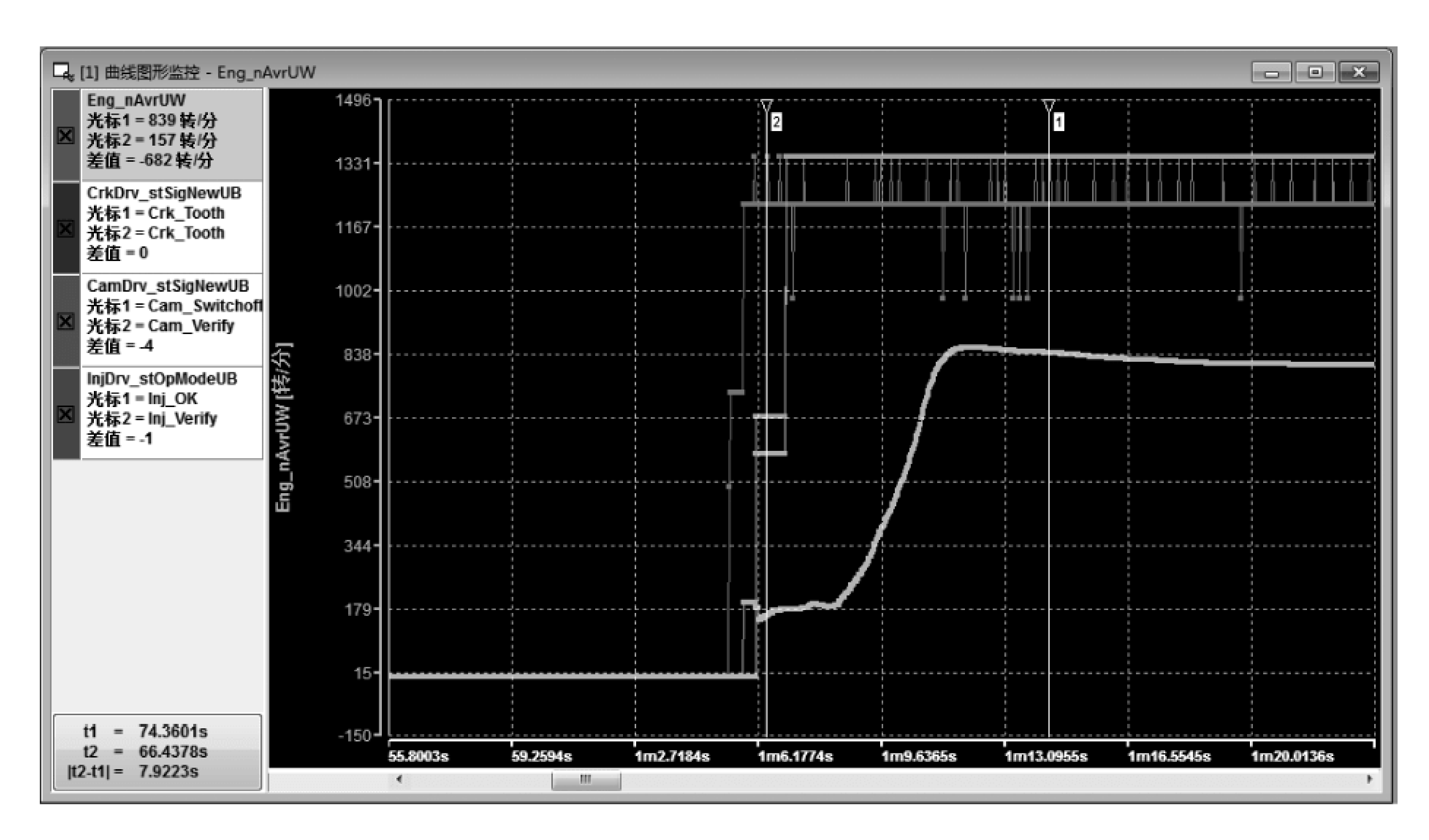


图 C-4　曲轴、凸轮轴转速信号状态图

4.1.3　试验结论

在上述转速变化的过程中，监控曲轴转速信号处理状态、凸轮轴转速信号处理状态和同步状态的变化情况，CrkDrv_stSigNewUB 状态在 Tooth 和 LastTooth 之间切换，CamDrv_stSigNewUB 状态为 Switchoff，同步状态 InjDrv_stOpModeUB 为 OK。柴油机相位判断功能正常。

4.2　起动试验

4.2.1　试验目的

验证柴油机起动情况，为后期整车起动试验做好基础准备。

4.2.2　试验地点

北京某油泵油嘴股份有限公司产品研究院 AVL 试验台架，试验对象为 YN38 柴油机。

4.2.3　试验过程

在水温大于 50℃和室温(水温大于 0℃，小于 10℃)两种条件下试验。对起动性能的评价指标主要是起动时间、转速波动。标定目标为保证起动平顺迅速过渡到怠速状态，即在尽量缩短起动时间的前提下，保证转速曲线的顺滑，避免锯齿形波动。在起动过程中主要标定的是相位、起动定时、轨压。

图 C-5、图 C-6 分别为水温为 5℃和 60℃时的起动情况。

4.2.4　试验结论

(1) 起动时间在 1～3 s 起动成功。

(2) 起动过程，柴油机起动过渡到怠速比较平稳，上冲转速不大于 50 r/min，下冲转速不大于 30 r/min。

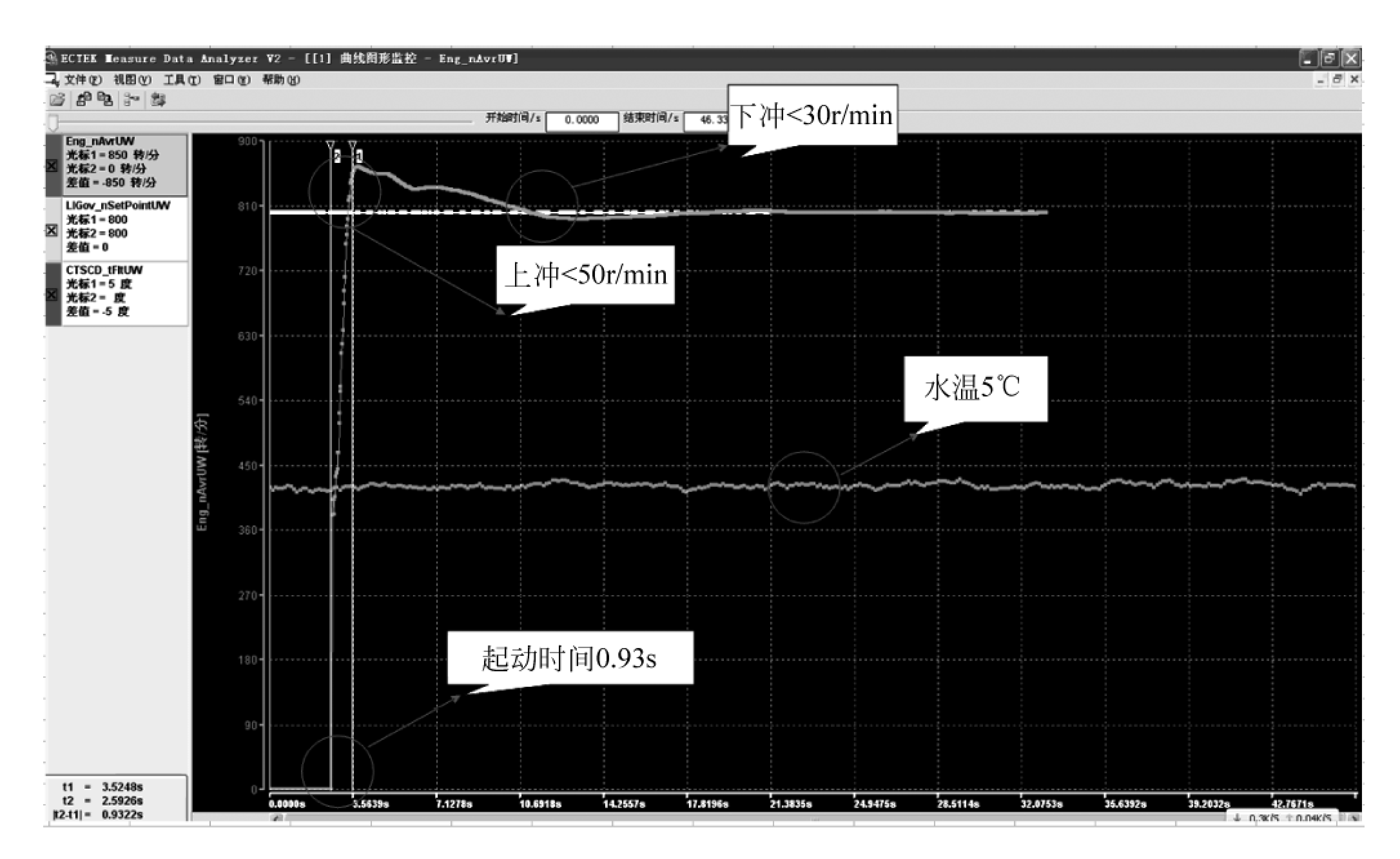


图 C-5 水温为 5℃时起动曲线

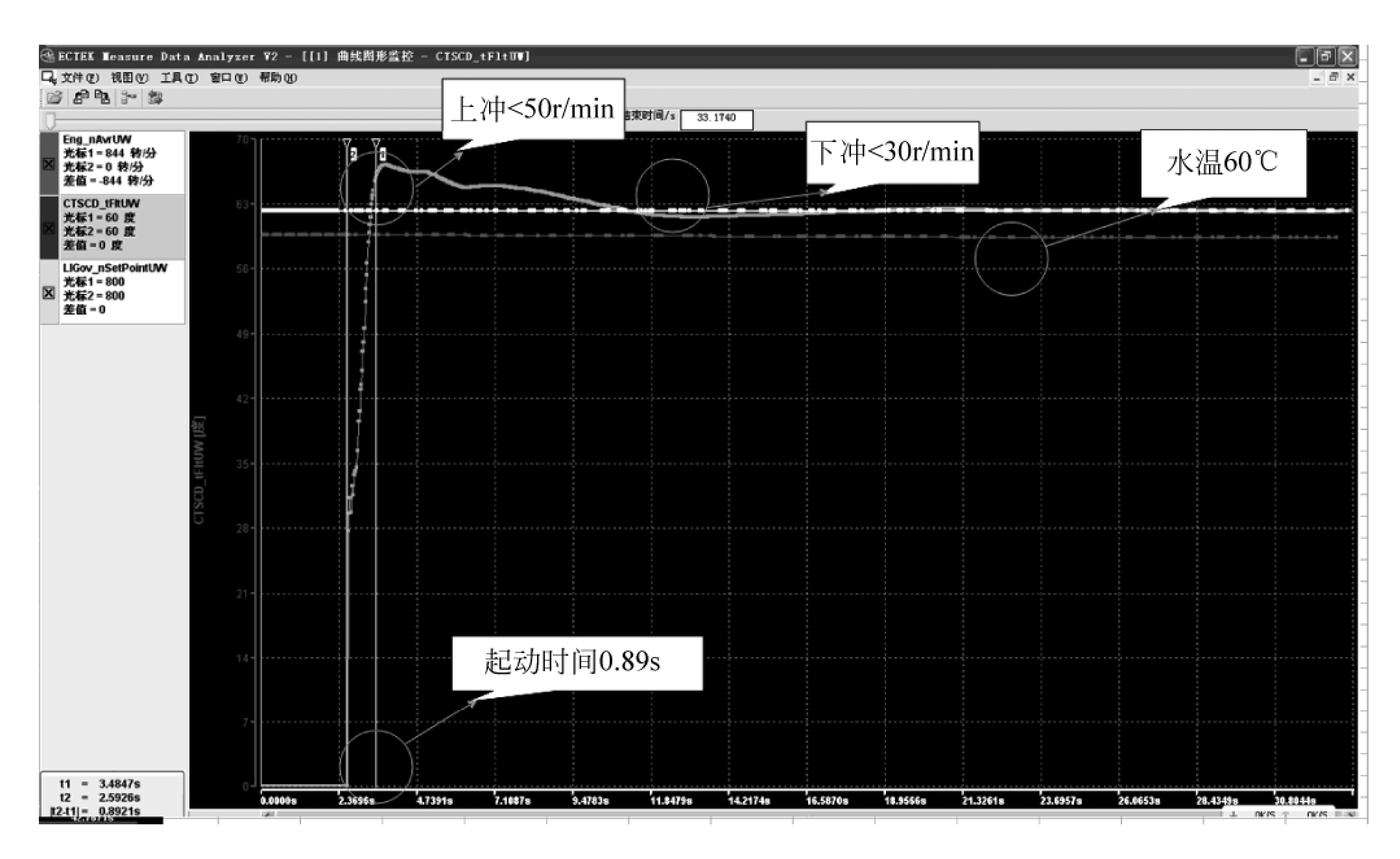


图 C-6 水温为 60℃时起动曲线

4.3　低怠速试验

4.3.1　试验目的

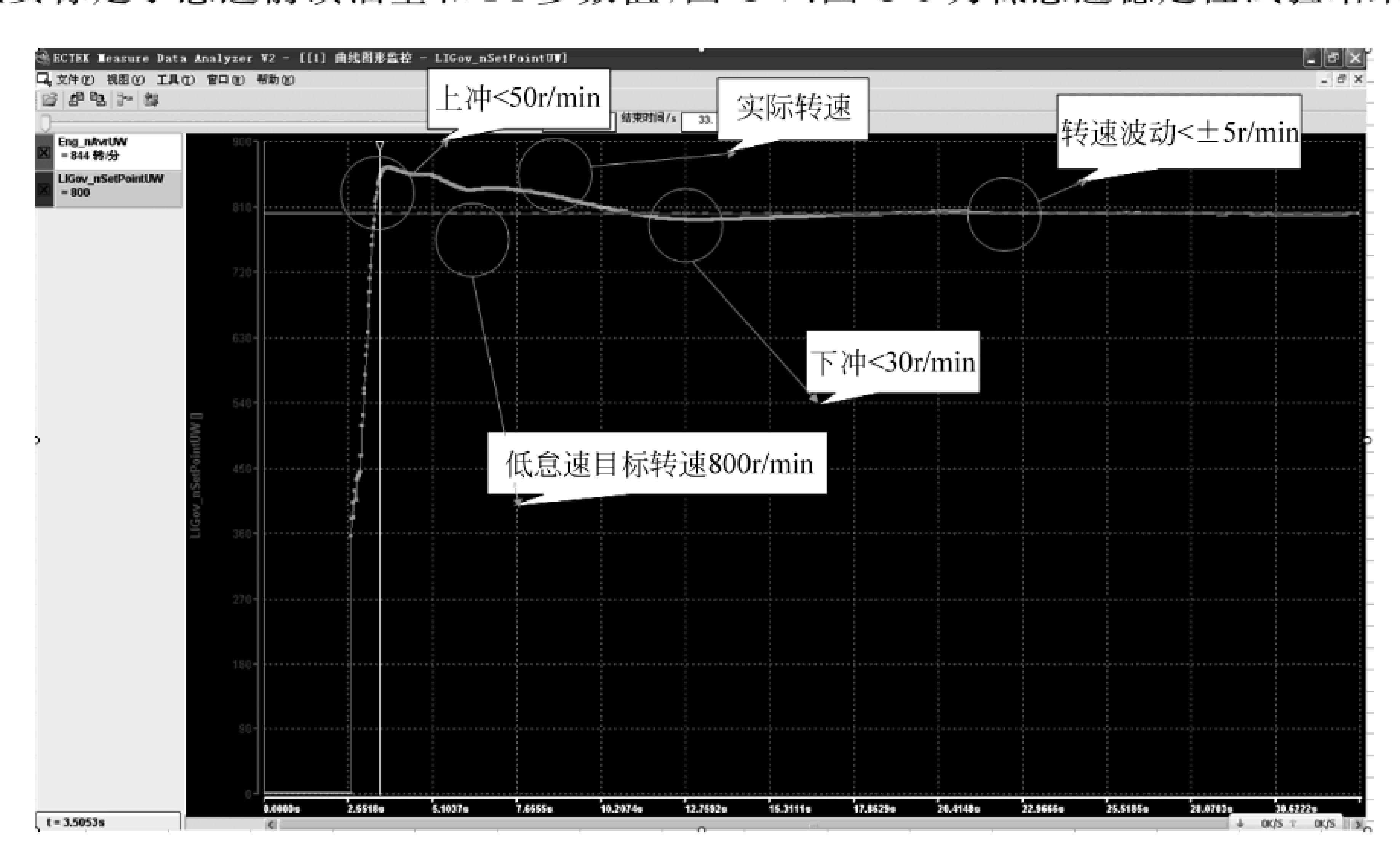
能够按照设定要求及时进入低怠速，确定怠速实测值是否能够快速准确地跟随理论设定值，减小转速上冲和下冲的幅度及波动收敛的时间。

4.3.2　试验地点

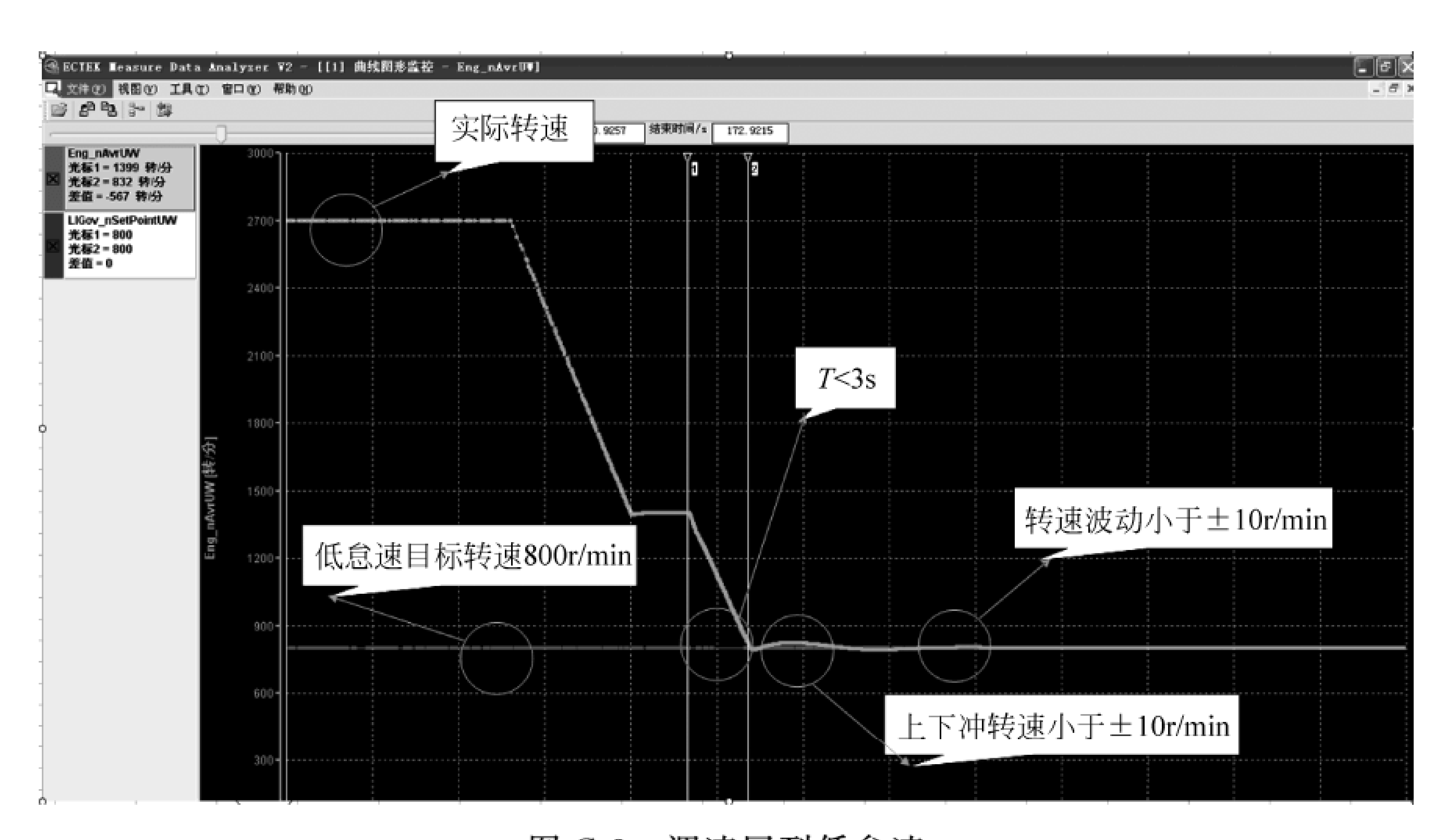
北京某油泵油嘴股份有限公司产品研究院AVL试验台架，试验对象为YN38柴油机。

4.3.3　试验过程

主要标定了怠速前馈油量和PI参数值，图C-7、图C-8为低怠速稳定性试验结果。



图C-7　起动过渡到低怠速



图C-8　调速回到低怠速

4.3.4 试验结论

稳态性能：怠速参数经标定后，柴油机转速波动可控制在±5 r/min 范围内。

瞬态突变：将柴油机转速提升至 3500 r/min 以上后，突卸油门至 0。柴油机可从高转速直接回到怠速状态。整个过程中转速没有大范围波动(转速下冲最低值和随后的上冲最高值与怠速目标值的偏差可控制在±10 r/min)，且整个瞬态过程在 3 s 内完成。

4.4 外特性试验

4.4.1 试验目的

根据柴油机厂要求的外特性曲线，在满足柴油机爆压、排温、排放等柴油机设计参数限制条件下，对外特性工况点的油量、轨压和主喷提前角脉谱进行优化，确保柴油机达到扭矩、油耗、烟度、排放指标，使得柴油机能正常、安全地工作。

4.4.2 试验地点

北京某油泵油嘴股份有限公司产品研究院 AVL 试验台架，试验对象为 YN38 柴油机。

4.4.3 试验过程

(1) 监测柴油机功率、扭矩、油耗、排气烟度、排气温度、NO_x、HC、CO 等性能参数，从 3000～1000 r/min，每隔 200 r/min 为一试验点，100％负荷，从小到大逐步增大喷油量，优化喷油定时，直到柴油机外特性满足柴油机设计指标要求。

(2) 易控 ECU＋Bosch 泵系统柴油机外特性与博世 ECU＋博世泵系统柴油机外特性试验结果对比如下表所示，外特性曲线如图 C-9～图 C-11 所示。

转速/(r/min)	转矩/(N·m)		功率/kW		油耗率/(g/(kW·h))	
	易控 ECU＋博世泵	博世 ECU＋博世泵	易控 ECU＋博世泵	博世 ECU＋博世泵	易控 ECU＋博世泵	博世 ECU＋博世泵
3000	265.0	266.4	83.25	83.69	248.9	252.15
2800	285.0	283.2	83.56	83.03	238.9	240.03
2600	297.0	296.1	80.86	80.6	249.3	246.4
2400	302.0	305.2	75.90	76.71	241.5	240.92
2200	312.0	317.6	71.87	73.17	233.7	233.91
2000	320.0	320.0	67.02	67.02	225.5	227.22
1800	322.0	319.7	60.69	60.25	229.4	232.57
1600	328.0	324.6	54.95	54.38	204.5	207.93
1400	317.0	319.3	46.47	46.81	204.2	204.83
1200	314.0	315.5	39.46	39.64	209.8	207.23
1000	281.0	287.0	29.42	30.05	214.3	215.88

特别指出，易控 ECU＋博世共轨泵柴油机外特性数据为 13 工况标定后数据。

易控 ECU＋博世共轨泵系统标定过程中，为满足 ESC 排放法规，对相应工况点的柴油机控制参数进行了调整，牺牲了一些外特性指标，但扭矩功率基本满足开发要求。排放测试

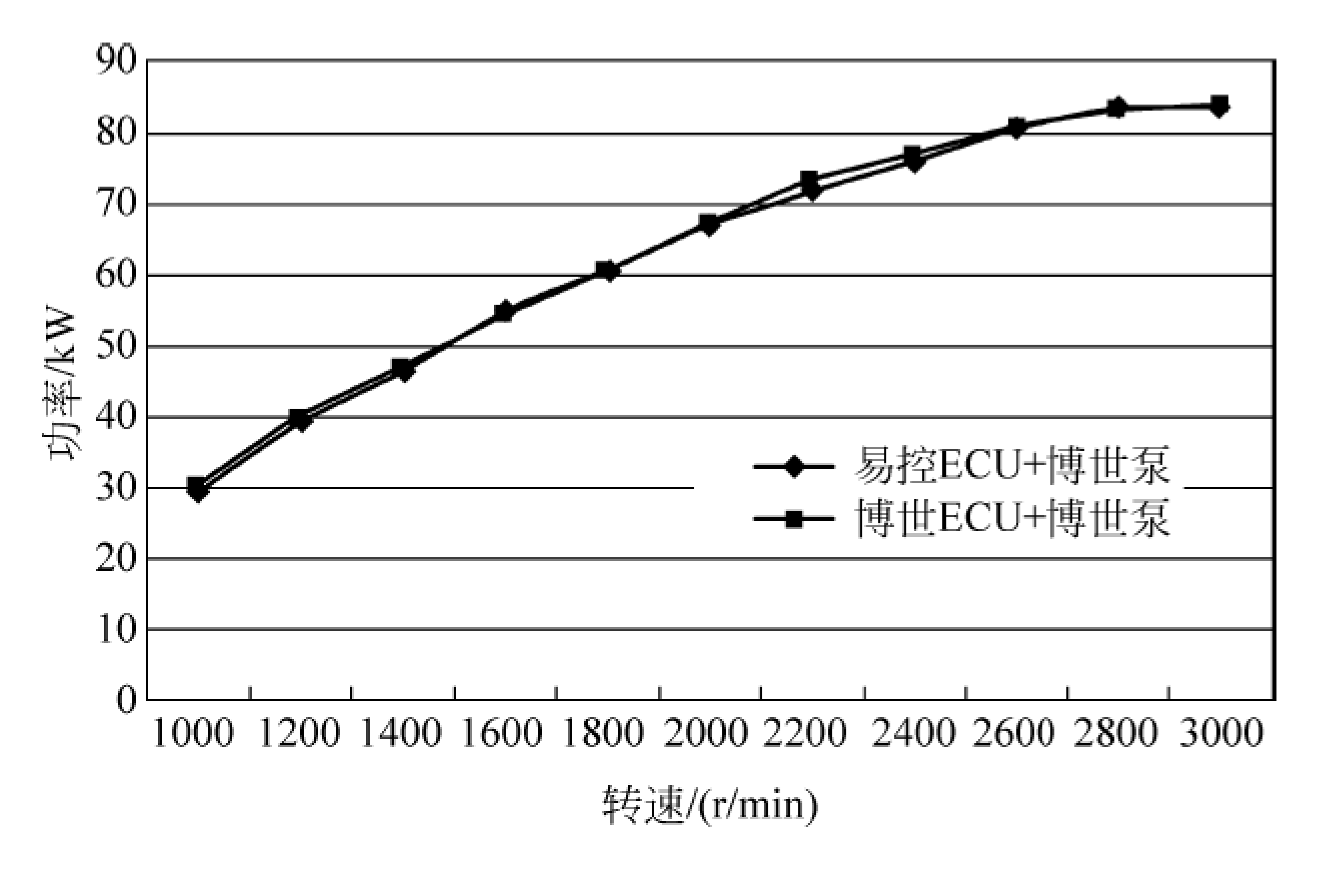


图 C-9　不同油泵外特性曲线(功率-转速)

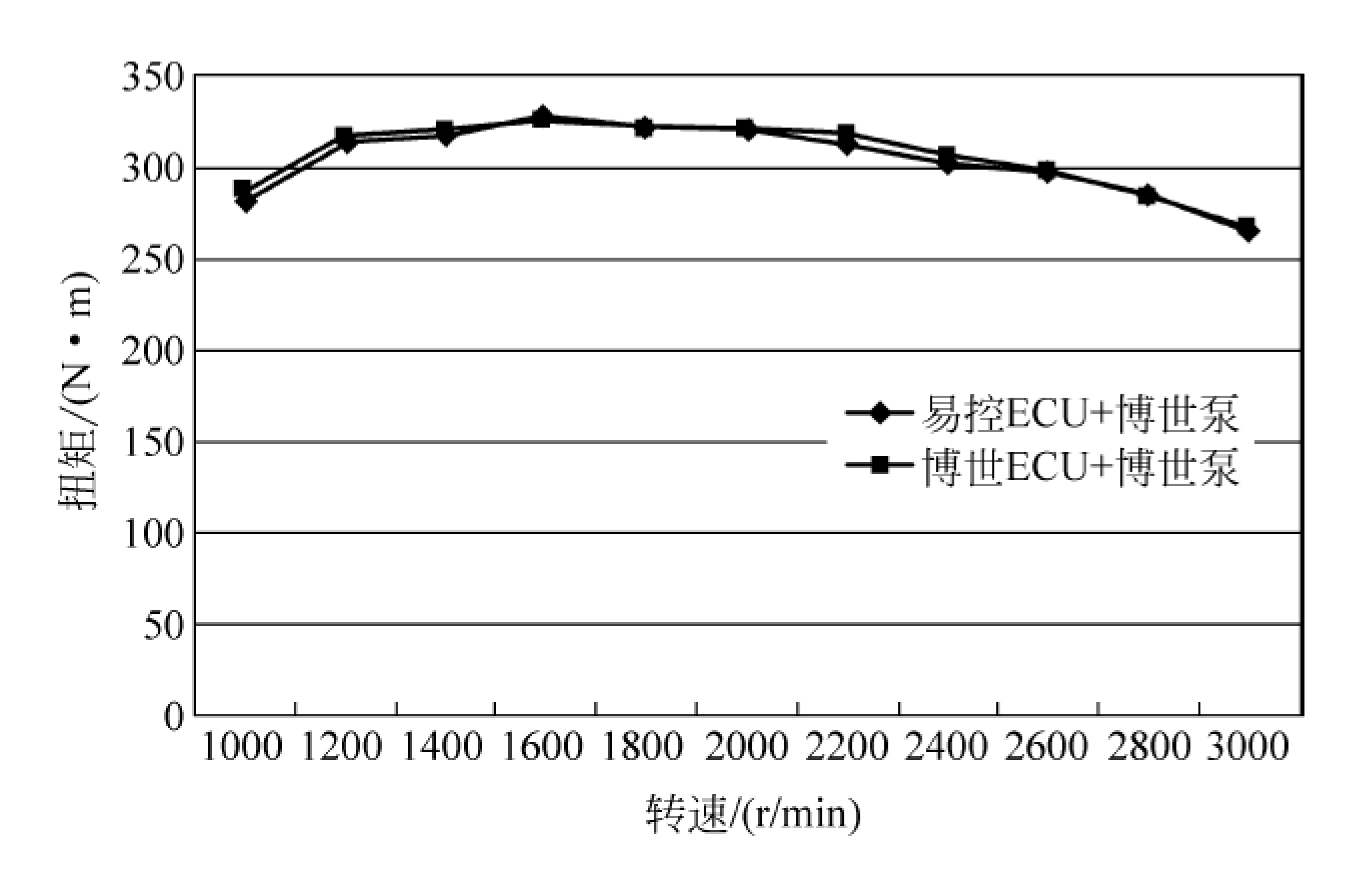


图 C-10　不同油泵外特性曲线(扭矩-转速)

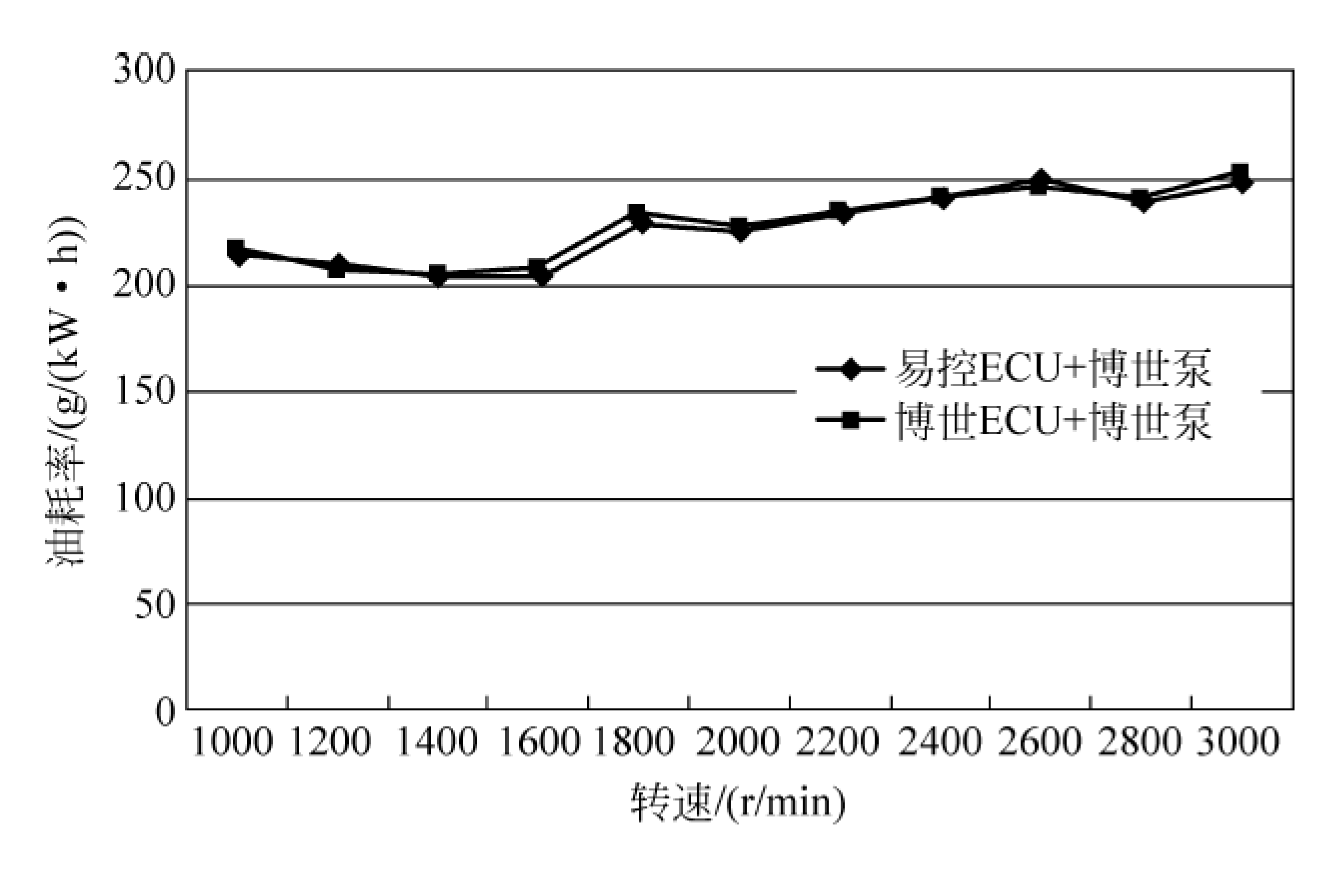


图 C-11　不同油泵外特性曲线(油耗率-转速)

点转速分别为 1789 r/min、2243 r/min 和 2696 r/min。

从经济性方面看，易控 ECU+博世泵系统外特性标定功率点油耗率为 248.9 g/(kW·h)，全负荷范围内的最低油耗率为 204.2 g/(kW·h)，博世 ECU+博世泵系统对应的指标分别为 252.15 g/(kW·h)和 204.83 g/(kW·h)；在非排放控制区(1000 r/min、1200 r/min、1400 r/min、2000 r/min 和 3000 r/min)，两个系统油耗基本相同；在排放控制区，为了追求低 NO_x 排放，喷油定时一般都比较小，导致该区的燃油经济性下降。

4.4.4 试验结论

柴油机排温、排放等参数满足设计限制条件下，扭矩、油耗、功率等指标满足柴油机厂的开发要求。